



UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA

SEDE GUAYAQUIL

FACULTAD DE INGENIERIAS

CARRERA DE INGENIERIA ELÉCTRICA

**TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
ELECTRICO**

TEMA:

ESTUDIO, DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN NUEVO SISTEMA DE PROTECCIÓN ELECTRICA PARA EL MOTOR SÍNCRONO DE 3MW - 4.16KV DEL MOLINO DE BOLAS DE CRUDO DE LA FABRICA DE CEMENTO HOLCIM ECUADOR - PLANTA GUAYAQUIL.

AUTORES:

ANDRES FERNANDO ORTIZ BOADA
FRANKLIN AGUSTIN VITERI NAVARRETE

DIRECTOR DE TESIS:

ING. ERVIN SOLANO

GUAYAQUIL, JULIO 2014

DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Yo, Andrés Fernando Ortiz Boada Portador de la cédula de ciudadanía N° 0923846638 estudiante de la Universidad Politécnica Salesiana declaro que la responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, me corresponde exclusivamente.

Guayaquil, Julio de 2014.

Andrés Fernando Ortiz Boada
Autor

DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Yo, Franklin Agustín Viteri Navarrete Portador de la cédula de ciudadanía N° 1203474273 estudiante de la Universidad Politécnica Salesiana declaro que la responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, me corresponde exclusivamente.

Guayaquil, Julio de 2014.

Franklin Agustín Viteri Navarrete
Autor

CERTIFICACIÓN

Que la Tesis ha sido desarrollada en su totalidad por los señores: Andrés Fernando Ortiz Boada, Franklin Agustín Viteri Navarrete bajo mi dirección, por lo que autorizo su presentación.

Guayaquil, Julio de 2014.

Ing. Ervin Solano Villegas
Director de Tesis

DEDICATORIA

Con todo mi cariño y amor, para aquellas personas tan especiales en mi vida, quienes dedicaron su tiempo en este largo camino que es la educación, gracias por la motivación en los momentos en que entendía que el camino concluía, a ustedes padres queridos mi amor y mi agradecimiento.

Milton y Elena.

Andrés F. Ortiz Boada

DEDICATORIA

Dedico este trabajo principalmente a Dios, por haberme dado la vida y permitirme haber llegado hasta este momento tan importante de mi formación profesional. A mi abuelita que en paz descanse (+), porque fue un pilar fundamental en mis inicios como persona y en mi vida estudiantil, aunque no estés conmigo sé que estas muy orgullosa de mi. A mi madre Juanita, por enseñarme a no rendirme en los momentos difíciles y siempre perseverar a través de sus sabios consejos. A mi familia en general, porque me han brindado su apoyo incondicional y por compartir conmigo buenos y malos momento.

Franklin A. Viteri Navarrete.

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto es el resultado del esfuerzo en conjunto, la dedicación y el compromiso por obtener un resultado óptimo en la elaboración de tesis.

Dando las gracias primero a Dios, por darme salud y fuerza para cumplir mis objetivos, a mis padres Milton y Elena por ser una motivación en mi vida, a mis compañeros de trabajo Julio Gutiérrez, Jorge Santana, José Tumbaco, Jonathan Zambrano, Catherine Delgado por brindarme su ayuda en la culminación de este proyecto, a mi tutor Ervin Solano por su valioso aporte en conocimiento y el tiempo dedicado en la elaboración de la tesis.

Una mención especial a un amigo y ex compañero de trabajo Julio Pérez, por su importante ayuda y comprensión, por brindarme el tiempo necesario para que lograra terminar esta valiosa e importante fase de la vida estudiantil que es la universidad.

Andrés F. Ortiz Boada.

Agradezco en primer lugar a Dios por bendecirme y llegar hacer realidad este sueño anhelado. A la Universidad Politécnica Salesiana por darme la oportunidad de estudiar y ser un profesional. De igual manera agradecer a mi Tutor de Tesis de Grado, Ing. Ervin Solano por su visión crítica, por su rectitud en su profesión como docente, por sus consejos, que ayudan a formarte como persona e investigador. A mis compañeros de trabajos y un agradecimiento especial a mi compañero de Tesis Andrés Ortiz por darme la motivación de no desmayar y culminar nuestro proyecto.

Franklin A. Viteri Navarrete.

INDICE

CAPITULO I.....	25
1 EL PROBLEMA.....	25
1.1 Planteamiento del problema.....	25
1.2 Tema.....	26
1.3 Delimitación del problema.....	26
1.3.1 Temporal.....	26
1.3.2 Espacial.....	27
1.3.3 Académica.....	27
1.4 Objetivos.....	27
1.4.1 Objetivo general.....	27
1.4.2 Objetivos específicos.....	27
1.5 Hipótesis.....	28
1.6 Variables e indicadores.....	28
1.6.1 Variable dependiente (causa).....	28
1.6.2 Variable independiente (efecto).....	28
1.7 Variables intervinientes.....	28
1.8 Indicadores.....	28
1.9 Población y muestra.....	29
1.10 Metodología.....	29
1.10.1 Método Científico.....	29
1.10.2 Método Documental Bibliográfico.....	29
1.10.3 Método Histórico.....	29
1.10.4 Método Experimental y Simulaciones.....	30
1.10.5 Método Analítico Sintético.....	30
CAPITULO II.....	32
2 MARCO TEORICO.....	32
2.1 Motor Síncrono.....	32
2.1.1 Introducción al motor síncrono.....	32
2.1.2 Construcción del motor sincrónico.....	33
2.1.3 Principio de funcionamiento del motor sincrónico.....	34

2.1.4	Análisis de las formas de arranque y operación del motor síncrono.	35
2.1.5	Dificultades en el arranque del motor síncrono.	37
2.1.6	Torque de salida del motor síncrono.	39
2.1.7	Excitación del motor síncrono.	39
2.1.8	Par de reluctancia síncrona.	40
2.1.9	Torque del motor durante el arranque.	40
2.1.10	Corriente de arranque.	41
2.1.11	Resistencia de descarga de campo.	42
2.1.12	Funcionamiento motor síncrono Allis Chalmer molino de bolas de Cemento.	43
2.2	Justificación del uso del relé electrónico digital.	47
2.2.1	Relés electromecánicos de protección.	47
2.2.2	Relés electrónicos digitales de protección.	47
2.2.3	Ventajas.	48
2.2.4	Ventajas del relé digital respecto a relés electromecánicos.	50
2.2.5	Descripción del relé digital multifuncional General Electric 469.	51
2.3	Análisis de corrientes de cortocircuito en el sistema eléctrico.	57
2.3.1	Definición.	57
2.3.2	Objetivo.	57
2.3.3	Importancia.	58
2.3.4	Características del cortocircuito: asimetría.	59
2.3.5	Fuentes generadoras de corrientes de cortocircuito.	61
2.3.6	Componentes que limitan la corriente de cortocircuito.	63
2.3.7	Fallas más comunes en el sistema eléctrico.	65
2.3.7.1	Simétricas (balanceadas).	65
2.3.7.2	Asimétricas (desbalanceadas).	66
2.3.8	Métodos de solución para análisis de fallas de cortocircuito.	66
2.4	Referencia el uso de la normativa en la protección del motor síncrono estándar IEEE C37.96.	73
2.4.1	Resumen.	73
2.4.2	Documentos estándares IEEE.	73
2.4.3	Glosario de terminología para motores.	75
2.4.4	Descripción del equipo.	78
2.4.5	Requisitos de protección del motor síncrono.	85

2.4.6	Protección al devanado del estator.....	87
2.4.7	Protección contra fallas del estator.	96
2.4.8	Condiciones anormales de alimentación.....	102
2.4.8.1	Discusión general.....	102
2.4.9	Condiciones de funcionamiento anormales.	109
2.4.10	Especificaciones de protección del motor.	109
2.4.11	Tablas de protección del motor.....	110
2.4.12	Configuración y ajuste de los dispositivos de protección.....	116
2.4.12.11	Dispositivo 50G. Relé de sobrecorriente de tierra.....	123
2.4.13	Dispositivo 51-Rele de sobrecorriente de tiempo definido (TOC).....	123
CAPITULO III.....		128
3	MARCO METODOLOGICO.....	128
3.1	Descripción general de Holcim ecuador planta Guayaquil.....	128
3.1.1	Historia.....	128
3.1.2	Funcionamiento general.....	132
3.2	Descripción del área de Molino de Crudo de Bolas.....	136
3.3	Descripción del Sistema eléctrico - Planta Holcim.....	136
3.4	Datos del sistema eléctrico.....	137
3.4.1	Subestación eléctrica principal Holcim.	138
3.5	Subestación eléctrica área Molino de Crudo 1.....	140
3.6	Equipos usados para el cálculo de cortocircuito del sistema.	141
3.6.1	Interruptores (Switchgear).	142
3.7	Relés digitales de protección.....	144
3.7.1	Conceptos generales.	144
3.8	Calculo de corrientes de cortocircuito.....	146
3.8.1	Definición de términos.....	148
3.9	Metodología programa ETAP 7.5.....	151
3.9.1	Barra de herramienta de cortocircuito ANSI.	151
3.9.1.2	Fallos LG, LL, LLG, y de 3 fases - ½ ciclo (máx. corriente de.....	152
3.9.1.4	Fallos LG, LL, LLG, y de 3 fases - 30 ciclos (mín. corriente de.....	152
3.10	Descripción General de la Metodología de Cálculo.	153
3.10.1	Datos del bus.....	154
3.10.2	Fuente o utilidad (Power data grid).	155
3.10.3	Datos de motores síncronos.	156

3.10.4	Datos del fusible.	156
3.10.5	Datos de cables alimentadores.	157
3.11	Análisis de coordinación del dispositivo.	161
3.12	Modificación del control de arrancador motor síncrono molino bolas de Crudo.	166
3.13	Ajustes de protección del motor síncrono CB.361-1X3.	167
3.14	Ajuste de protecciones del relé General Electric SR469.	167
3.15	Equipo de mediciones eléctricas Pdma MCEmax	171
3.15.1	Zonas de Fallas	172
3.15.2	Programa MCEGold	173
3.15.3	Procedimiento para obtener la curva de arranque del motor síncrono.	173
3.16	Unidad de pruebas Universal de Relés Omicron CMC 356	180
3.16.1	Características principales	180
3.16.2	Programa Test Universe.	181
3.17	Procedimiento para simulación de fallas del relé de protección de motores GE 469.	182
4	ANÁLISIS Y RESULTADOS.	189
4.1	Introducción.	189
4.2	Análisis obtenidos del informe de cortocircuito.	189
4.2.1	Resultados de análisis de cortocircuito de red eléctrica Holcim.	190
4.3	Análisis obtenidos de la curva de arranque del motor.	200
4.3.1	Resultados obtenidos en curva de arranque de motor síncrono CB 361- 1X3.	201
4.4	Análisis de coordinación del relé Cutler Hammer MP300.	203
4.4.1	Resultados obtenidos en grafica de coordinación relé Cutler Hammer MP300.	204
4.5	Análisis de los ajustes de protecciones del relé General Electric SR469.	206
4.6	Resultados obtenidos en grafica de coordinación relé General Electric SR469.	210
4.7	Resultados de protección de elementos de voltaje en relé General Electric SR469.	214
4.7.1	Protección de bajo voltaje (27).	214
4.7.2	Protección de Frecuencia (81).	214

4.8	Resultados de protección de arranque del motor en relé General Electric SR469.	215
4.8.1	Protección por secuencia incompleta (48).	215
4.8.2	Protección por bloqueo de arranques múltiples.	216
4.9	Resultados de protección de corriente del motor en relé General Electric SR469.	216
4.9.1	Protección por desbalance de corriente (46).	216
4.10	Prueba de simulación de fallas en relé SR469.	217
4.11	Resultado de modificación de control del arrancador motor molino bolas de Crudo.	225
CAPÍTULO V		240
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	240
5.1	Conclusión de la curva de arranque del motor síncrono.	240
5.2	Conclusión de la instalación del nuevo relé General Electric SR469.	240
5.3	Recomendaciones para la programación del relé General Electric SR469.	241
5.4	Conclusión protección diferencial (87) en el nuevo relé General Electric SR469.	242
5.5	Recomendación de ajuste de la protección de secuencia incompleta (46).	242
5.6	Conclusión protección sobrecorriente (50) en el nuevo relé General Electric SR469.	243
5.7	Recomendaciones para la puesta en servicio del relé General Electric SR469.	243
5.8	Recomendaciones de confiabilidad en el arrancador del motor síncrono.	245
5.9	Recomendaciones de revisión del relé General Electric SR469.	246
Bibliografía.		248

INDICE ILUSTRACIÓN

ILUSTRACIÓN 1 ROTOR DE MOTOR SÍNCRONO.....	33
ILUSTRACIÓN 2.ESQUEMA DE ARRANQUE A TENSIÓN REDUCIDA.	36
ILUSTRACIÓN 3 PARTES DE UN MOTOR SÍNCRONO.....	44
ILUSTRACIÓN 4 PLANO ELÉCTRICO MOTOR MOLINO DE BOLAS DE CRUDO.....	46
ILUSTRACIÓN 5 ESQUEMA DE RELÉ ELECTRÓNICO DIGITAL.	48
ILUSTRACIÓN 6 RELÉ DIGITAL GENERAL ELECTRIC SR469.	51
ILUSTRACIÓN 7 DIAGRAMA UNIFILAR DE PROTECCION DEL RELÉ SR469.....	52
ILUSTRACIÓN 8 FUNCIONES DE PROTECCIÓN DEL RELÉ SR469.	53
ILUSTRACIÓN 9 DISTRIBUCIÓN DE TERMINALES DEL RELÉ SR469.	54
ILUSTRACIÓN 10 DIAGRAMA TÍPICO DE ALAMBRADO SR469.....	55
ILUSTRACIÓN 11 CONEXIÓN DE TC DE TIERRA RESIDUAL.....	56
ILUSTRACIÓN 12 CONEXIÓN DE TRANSFORMADOR DE VOLTAJE EN ESTRELLA.....	57
ILUSTRACIÓN 13 ASIMETRÍA DE LA CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO.	60
ILUSTRACIÓN 14 DIAGRAMA DE CORTOCIRCUITO DE LAS DISTINTAS FUENTES.	63
ILUSTRACIÓN 15 CIRCUITO DE CONTROL DE TRES HILOS CON PROTECCIÓN CONTRA LA PÉRDIDA DE LA TENSIÓN	81
ILUSTRACIÓN 16 PROTECCIÓN DEL CIRCUITO DE CONTROL DE TRES HILOS CON EL TIEMPO DE RETARDO DE PÉRDIDA DE TENSIÓN.....	82
ILUSTRACIÓN 17 TÍPICO CONTROL DE UN MOTOR TIPO ESCOBILLA.	84
ILUSTRACIÓN 18 TÍPICO ARRANQUE DE MOTOR Y CURVA DE CAPACIDAD TÉRMICA.....	90
ILUSTRACIÓN 19 CURVA TÍPICAS DE TIEMPO-CORRIENTE Y LÍMITES TÉRMICOS.	91
ILUSTRACIÓN 20 PROTECCIÓN DE ROTOR BLOQUEADO CON RELÉ DE SOBRECORRIENTE CON TIEMPO DEFINIDO.....	92
ILUSTRACIÓN 21 PROTECCIÓN DE DAÑO TÉRMICO UTILIZANDO DOS RELÉS DE SOBRECORRIENTE.	98
ILUSTRACIÓN 22 TRANSFORMADOR DE CORRIENTE TOROIDAL.	100
ILUSTRACIÓN 23 PROTECCIÓN A TIERRA DEL BUS POR RELÉ Y CT.	101
ILUSTRACIÓN 24 PROTECCIÓN DIFERENCIAL DE MOTORES CONECTADOS EN ESTRELLA O EN DELTA. .	102
ILUSTRACIÓN 25 CORRIENTE EN EL DEVANADO DEL MOTOR CON UNA FASE EN CIRCUITO ABIERTO. ..	107
ILUSTRACIÓN 26 SECUENCIA PARA UNA CONDICIÓN DE FASE UNA FASE ABIERTA.	107
ILUSTRACIÓN 27 CORRIENTE DE SECUENCIA PARA UNA FASE ABIERTA.	108
ILUSTRACIÓN 28 CONTROLADOR DE MOTOR MEDIANO CLASE E1 (VER TABLA 1).....	111
ILUSTRACIÓN 29 CONTROLADOR DE MOTOR DE MEDIA TENSIÓN CLASE E2	112
ILUSTRACIÓN 30 ARRANCADOR DE MOTORES CON INTERRUPTOR, PROTECCIÓN DE GRANDES MOTORES.	113
ILUSTRACIÓN 31 ARRANCADOR DE MOTORES CON INTERRUPTOR, PROTECCIÓN DE GRANDES MOTORES.	114
ILUSTRACIÓN 32 AJUSTE TÍPICO DE RELÉ DE SOBRECORRIENTE 50/51.....	122

ILUSTRACIÓN 33 AJUSTE ADICIONAL PROTECCIÓN 50 CON TIEMPO DEFINIDO.....	122
ILUSTRACIÓN 34 TÍPICO AJUSTE 50/51 CUANDO 50 SUPERVISA A 51.....	124
ILUSTRACIÓN 35 LOGO DE LA CEMENTO NACIONAL.....	131
ILUSTRACIÓN 36 LOGO DE LA CORPORACIÓN HOLCIM S.A.	131
ILUSTRACIÓN 37 PLANTA SAN RAFAEL EN LATACUNGA.	131
ILUSTRACIÓN 38 MÍMICO DE LA TRITURADORA PRIMARIA.....	133
ILUSTRACIÓN 39 FICHA TÉCNICA DE LA MOLINO VERTICAL DE CRUDO.	134
ILUSTRACIÓN 40 PROCESO DE FABRICACIÓN DE CRUDO.	135
ILUSTRACIÓN 41 SISTEMA ELÉCTRICO UNIFILAR PLANTA HOLCIM.	137
ILUSTRACIÓN 42 SWITCHGEAR SUBESTACIÓN PRINCIPAL HOLCIM.....	139
ILUSTRACIÓN 43 DIAGRAMA UNIFILAR ELÉCTRICO SUBESTACIÓN PRINCIPAL HOLCIM.	140
ILUSTRACIÓN 44 DIAGRAMA UNIFILAR SUBESTACIÓN MOLINO DE CRUDO.	141
ILUSTRACIÓN 45 INTERRUPTOR 3000A ALIMENTACIÓN BUS SUBESTACIÓN PRINCIPAL.	142
ILUSTRACIÓN 46 PLACA INTERRUPTOR 1200A ALIMENTACIÓN BUS SUBESTACIÓN PRINCIPAL.	143
ILUSTRACIÓN 47 INTERRUPTOR 1200A ALIMENTACIÓN DIFERENTES SUBESTACIONES DE PROCESO... 143	143
ILUSTRACIÓN 48 EVOLUCIÓN DE LOS RELÉS DE PROTECCIÓN.	145
ILUSTRACIÓN 49 CONFIGURACIÓN DATOS DEL BUS EN ETAP7.5.	155
ILUSTRACIÓN 50 CONFIGURACIÓN DATOS DE FUENTES EN ETAP7.5.	155
ILUSTRACIÓN 51 CONFIGURACIÓN DATOS DE MOTORES EN ETAP7.5.	156
ILUSTRACIÓN 52 CONFIGURACIÓN DATOS DE FUSIBLES EN ETAP7.5.....	157
ILUSTRACIÓN 53 CONFIGURACIÓN DATOS DE CABLES EN ETAP7.5.	158
ILUSTRACIÓN 54 CONFIGURACIÓN DATOS DE CABLES EN ETAP7.5.	158
ILUSTRACIÓN 55 AJUSTE DE CASO DE ESTUDIO DE CORTOCIRCUITO EN ETAP 7.5.	159
ILUSTRACIÓN 56 AJUSTE DE CASO DE ESTUDIO DE CORTOCIRCUITO EN ETAP 7.5.	159
ILUSTRACIÓN 57 RESULTADO CASO DE ESTUDIO DE CORTOCIRCUITO EN ETAP 7.5.	160
ILUSTRACIÓN 58 INFORME GENERAL DE CORTOCIRCUITO EN ETAP 7.5.....	161
ILUSTRACIÓN 59 INFORME DE CORTOCIRCUITO A 4 CICLOS EN ETAP 7.5.....	161
ILUSTRACIÓN 60 ICONO DE COORDINACIÓN DE PROTECCIÓN EN ETAP 7.5.	162
ILUSTRACIÓN 61 BARRA DE HERRAMIENTA DE COORDINACIÓN DE PROTECCIÓN EN ETAP 7.5.	162
ILUSTRACIÓN 62 DEFINICIÓN DE ESTÁNDAR DE ESTUDIO EN ETAP 7.5.	163
ILUSTRACIÓN 63 SECUENCIA DE OPERACIÓN DE FALLAS EN ETAP 7.5.....	163
ILUSTRACIÓN 64 CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO Y SECUENCIA DE OPERACIÓN DE DISPOSITIVOS DEL SISTEMA EN ETAP 7.5.	164
ILUSTRACIÓN 65 EVENTO DE SECUENCIA DE OPERACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS EN ETAP 7.5.....	165
ILUSTRACIÓN 66 REPORTE DE IMPEDANCIAS DE SECUENCIA EN ETAP 7.5.....	166
ILUSTRACIÓN 67 CONTROL DE START/STOP DEL MOTOR MOLINO DE BOLAS DE CRUDO.....	167
ILUSTRACIÓN 68 AJUSTE DE PLACA DEL MOTOR SÍNCRONO EN ETAP 7.5.	168
ILUSTRACIÓN 69 AJUSTE DE MODO DE ARRANQUE DEL MOTOR SÍNCRONO EN ETAP 7.5.....	168
ILUSTRACIÓN 70 AJUSTE DE TRANSFORMADORES DE CORRIENTES EN ETAP 7.5.	169
ILUSTRACIÓN 71 PROTECCIONES INCLUIDAS EN RELÉ GENERAL ELECTRIC SR469.....	170

ILUSTRACIÓN 72 PROGRAMACIÓN DE RELÉ SR469 EN PROGRAMA ENERVISTA PARA PC.	171
ILUSTRACIÓN 73 EQUIPO DE MEDICIÓN PDMA MCEMAX.....	172
ILUSTRACIÓN 74 PARTES DE UN MOTOR, ZONAS DE FALLAS.	172
ILUSTRACIÓN 75 ICONO MCEGOLD EN EL ESCRITORIO	174
ILUSTRACIÓN 76 VENTANA DE LA BASE DE DATOS.	174
ILUSTRACIÓN 77 ELECCIÓN DE LA BASE DE DATOS	175
ILUSTRACIÓN 78 ACEPTACIÓN DE LA BASE DE DATOS	175
ILUSTRACIÓN 79 VENTANA PRINCIPAL DEL PROGRAMA MCEGOLD	176
ILUSTRACIÓN 80 EXPLORACIÓN EN EL ÁRBOL DE EQUIPOS	176
ILUSTRACIÓN 81 DATOS DE PLACA DEL MOTOR	177
ILUSTRACIÓN 82 ICONO DE ELECCIÓN DE PRUEBAS “TEST”	177
ILUSTRACIÓN 83 VENTANA SE SELECCIÓN DE LAS DISTINTAS PRUEBAS.....	178
ILUSTRACIÓN 84 VENTANA DE CAPTURE DE PRUEBA DE ARRANQUE.....	178
ILUSTRACIÓN 85 RESULTADO DE LA PRUEBA DE ARRANQUE DEL MOTOR SÍNCRONO.	179
ILUSTRACIÓN 86 CURVA DE ARRANQUE DEL MOTOR.	179
ILUSTRACIÓN 87 OMICRON CMC 356.....	181
ILUSTRACIÓN 88 SOFTWARE TEST UNIVERSE.	182
ILUSTRACIÓN 89 PROGRAMA TEST UNIVERSE.	185
ILUSTRACIÓN 90 CONFIGURACIÓN DE HARDWARE.....	186
ILUSTRACIÓN 91 CONFIGURACIÓN DE LAS SEÑALES DE VOLTAJES Y CORRIENTES.	186
ILUSTRACIÓN 92 CONFIGURACIÓN DE SALIDAS ANALÓGICAS.	187
ILUSTRACIÓN 93 PANTALLA PRINCIPAL PARA PRUEBAS.....	187
ILUSTRACIÓN 94 ANÁLISIS DE CORTOCIRCUITO ELECTROQUIL MÁXIMA GENERACIÓN ½ CICLO.	190
ILUSTRACIÓN 95 ANÁLISIS DE CORTOCIRCUITO ELECTROQUIL MÁXIMA GENERACIÓN 4 CICLOS.	190
ILUSTRACIÓN 96 ANÁLISIS DE CORTOCIRCUITO ELECTROQUIL MÁXIMA GENERACIÓN 30 CICLOS. ...	191
ILUSTRACIÓN 97 ANÁLISIS DE CORTOCIRCUITO ELECTROQUIL MÍNIMA GENERACIÓN ½ CICLO.	191
ILUSTRACIÓN 98ANÁLISIS DE CORTOCIRCUITO ELECTROQUIL MÍNIMA GENERACIÓN 4 CICLOS.	192
ILUSTRACIÓN 99 ANÁLISIS DE CORTOCIRCUITO ELECTROQUIL MÍNIMA GENERACIÓN 30 CICLOS.....	192
ILUSTRACIÓN 100 ANÁLISIS DE CORTOCIRCUITO SALITRAL MÁXIMA GENERACIÓN ½ CICLO.....	193
ILUSTRACIÓN 101 ANÁLISIS DE CORTOCIRCUITO SALITRAL MÁXIMA GENERACIÓN 4 CICLOS.	193
ILUSTRACIÓN 102ANÁLISIS DE CORTOCIRCUITO SALITRAL MÁXIMA GENERACIÓN 30 CICLOS.....	194
ILUSTRACIÓN 103 ANÁLISIS DE CORTOCIRCUITO SALITRAL MÍNIMA GENERACIÓN ½ CICLO.....	194
ILUSTRACIÓN 104ANÁLISIS DE CORTOCIRCUITO SALITRAL MÍNIMA GENERACIÓN 4 CICLOS.....	195
ILUSTRACIÓN 105 ANÁLISIS DE CORTOCIRCUITO SALITRAL MÍNIMA GENERACIÓN 30 CICLOS.....	195
ILUSTRACIÓN 106 ANÁLISIS DE CORTOCIRCUITO TIC MÁXIMA GENERACIÓN ½ CICLO.	196
ILUSTRACIÓN 107ANÁLISIS DE CORTOCIRCUITO TIC MÁXIMA GENERACIÓN 4 CICLOS.	196
ILUSTRACIÓN 108 ANÁLISIS DE CORTOCIRCUITO TIC MÁXIMA GENERACIÓN 30 CICLOS.....	197
ILUSTRACIÓN 109 ANÁLISIS DE CORTOCIRCUITO TIC MÍNIMA GENERACIÓN ½ CICLO	197
ILUSTRACIÓN 110 ANÁLISIS DE CORTOCIRCUITO TIC MÍNIMA GENERACIÓN 4 CICLOS.	198
ILUSTRACIÓN 111ANÁLISIS DE CORTOCIRCUITO TIC MÍNIMA GENERACIÓN 30 CICLOS.	198

ILUSTRACIÓN 112 IMPEDANCIA DE SECUENCIAS EN ANÁLISIS DE CORTOCIRCUITO.	199
ILUSTRACIÓN 113 CURVA DE ARRANQUE DEL MOTOR SÍNCRONO DEL MOLINO DE BOLAS DE CRUDO. .	201
ILUSTRACIÓN 114 MAGNITUDES DE CORRIENTE Y VOLTAJE EN CURVA DE ARRANQUE DEL MOTOR SÍNCRONO DEL MOLINO DE BOLAS DE CRUDO.	202
ILUSTRACIÓN 115 REGISTRO CURVA DE ARRANQUE DEL MOTOR SÍNCRONO DEL MOLINO DE BOLAS DE CRUDO.	202
ILUSTRACIÓN 116 COORDINACIÓN DEL RELÉ CUTLER HAMMER MP300.	203
ILUSTRACIÓN 117 FALLA MONOFÁSICA EN TERMINALES DEL MOTOR SIMULADO EN EL PROGRAMA ETAP 7,5.	205
ILUSTRACIÓN 118 SECUENCIA DE OPERACIÓN PARA UNA FALLA MONOFÁSICA EN LOS TERMINALES DEL MOTOR SÍNCRONO.	205
ILUSTRACIÓN 119 AJUSTE DE PREFERENCIAS RELÉ SR469 EN PROGRAMA ENER VISTA.	206
ILUSTRACIÓN 120 AJUSTE DE CORRIENTE Y VOLTAJE RELÉ SR469 EN PROGRAMA ENER VISTA.	207
ILUSTRACIÓN 121 AJUSTE DE ENTRADAS Y SALIDAS DIGITALES RELÉ SR469 EN PROGRAMA ENER VISTA.	207
ILUSTRACIÓN 122 AJUSTE DE PROTECCIÓN TÉRMICA RELÉ SR469 EN PROGRAMA ENER VISTA.	208
ILUSTRACIÓN 123 AJUSTE DE PROTECCIÓN DE CORRIENTE RELÉ SR469 EN PROGRAMA ENER VISTA. .	208
ILUSTRACIÓN 124 AJUSTE DE RTD RELÉ SR469 EN PROGRAMA ENER VISTA.	209
ILUSTRACIÓN 125 AJUSTE DE PROTECCIÓN DE VOLTAJE RELÉ SR469 EN PROGRAMA ENER VISTA.	209
ILUSTRACIÓN 126 AJUSTE DE SALIDAS ANÁLOGAS RELÉ SR469 EN PROGRAMA ENER VISTA.	210
ILUSTRACIÓN 127 COORDINACIÓN CURVA DE PROTECCIÓN DEL RELÉ SR469.	211
ILUSTRACIÓN 128 TIEMPO DE DISPARO POR SOBRECARGA RELÉ GENERAL ELECTRIC SR469.	212
ILUSTRACIÓN 129 TIEMPO DE DISPARO DE AJUSTE DE SOBRECARGA POR TABLA RELÉ SR469.	213
ILUSTRACIÓN 130 COORDINACIÓN CURVA DE PROTECCIÓN A TIERRA DEL RELÉ SR469.	213
ILUSTRACIÓN 150 RELÉS DE PROTECCIÓN DEL MOTOR SÍNCRONO (ANTES).	229

INDICE IMAGEN

IMAGEN 1 PROTECCIONES DEL MOTOR SÍNCRONO MOLINO DE BOLAS DE CRUDO (2013).	26
IMAGEN 2 MOTOR SÍNCRONO DE POLOS SALIENTES PLANTA HOLCIM-ECUADOR.	33
IMAGEN 3 MOTOR SÍNCRONO MOLINO DE BOLAS DE CEMENTO HOLCIM.	34
IMAGEN 4 ESTATOR Y ROTOR SÍNCRONO MOLINO DE BOLAS DE CEMENTO HOLCIM.	43
IMAGEN 5 MOTOR MOLINO DE CEMENTO HOLCIM.	43
ILUSTRACIÓN 6 MOLINO VERTICAL PARA INDUSTRIA DE CEMENTO.	130
IMAGEN 7 BARRA DE HERRAMIENTA DE CORTOCIRCUITO POR NORMA ANSI.	151
IMAGEN 8 OMICRON CMC 356 A UTILIZARSE.	182
IMAGEN 9 CONEXIÓN DE TERMINALES EN EL RELÉ DE PROTECCIÓN.	183
IMAGEN 10 REVISIÓN DE AJUSTES DE SIMULACIÓN EN EL MANUAL DEL RELÉ.	183
IMAGEN 11 INTERFAZ RELÉ/SOFTWARE.	184
IMAGEN 12 CONEXIÓN DE INTERCONEXIÓN RELÉ SR469- OMICRON CMC 356 FINALIZADA.	184
IMAGEN 13 CONEXIÓN DE TERMINALES EN RELÉ DE PROTECCIÓN PARA PRUEBA DE INYECCIÓN DE CORRIENTE.	185
IMAGEN 14 LECTURA DE VOLTAJE EN RELÉ DE PROTECCIÓN.	218
IMAGEN 15 LECTURA DE CORRIENTES EN RELÉ DE PROTECCIÓN.	219
IMAGEN 16 MENSAJE DE BAJO VOLTAJE EN RELÉ DE PROTECCIÓN.	220
IMAGEN 17 MENSAJE DE ACELERACIÓN COMO SECUENCIA INCOMPLETA.	221
IMAGEN 18 MENSAJE DE BAJA FRECUENCIA EN RELÉ DE PROTECCIÓN.	222
IMAGEN 19 MENSAJE DE ALTA FRECUENCIA EN RELÉ DE PROTECCIÓN.	223
IMAGEN 20 MENSAJE DE DESBALANCE DE CORRIENTE EN EL RELÉ DE PROTECCIÓN.	224
IMAGEN 21 MENSAJE DE PROTECCIÓN A TIERRA EN RELÉ DE PROTECCIÓN.	225
IMAGEN 22 CONTROL ARRANCADOR MOTOR SÍNCRONO (ACTUAL).	245

INDICE DE TABLAS

TABLA 1 CONTROLADOR DE MOTOR DE MEDIA TENSIÓN CLASE E. ANSI/NEMA ICS 2-1988, 324....	112
TABLA 2 PROTECCIÓN DE MOTORES DE MEDIA TENSIÓN	114
TABLA 3 PROTECCIÓN PARA EL CAMPO DE UN MOTOR SÍNCRONO.....	115
TABLA 4 FACTOR DE CORRECCIÓN DEPENDIENDO DEL FACTOR DE SERVICIO DEL MOTOR.	118
TABLA 5 EQUIVALENTE DEL S.N.I. ALIMENTADO DESDE PASCUALES.....	138
TABLA 6 EQUIVALENTE DEL S.N.I. ALIMENTADO DESDE SALITRAL.....	138
TABLA 7 DATOS NOMINALES TRANSFORMADORES DE POTENCIA SUBESTACIÓN PRINCIPAL.	139
TABLA 8 AJUSTES RELÉ DE PROTECCIONES ALIMENTADOR DE SUBESTACIÓN DE CRUDO1 Y PRINCIPAL.	146
TABLA 9 LISTA DE ESTÁNDAR IEEE-UL PARA EL CÁLCULO DE CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO.	147
TABLA 10 TIPO DE DISPOSITIVO Y FUNCIONES ASOCIADAS A LA RED DE MEDIO CICLO.	148
TABLA 11 IMPEDANCIA SUBTRANSIENTE RED DE MEDIO CICLO.	149
TABLA 12 TIPO DE DISPOSITIVO Y FUNCIONES ASOCIADAS A LA RED DE 4 CICLOS.	149
TABLA 13 IMPEDANCIA RED DE 4 CICLOS.....	150
TABLA 14 IMPEDANCIA RED DE 30 CICLOS.....	150
TABLA 15 PROTECCIONES PROGRAMADAS EN RELÉ GENERAL ELECTRIC SR469.....	170
TABLA 16 MAGNITUDES DE CORRIENTES PARA FALLAS MONOFÁSICAS Y TRIFÁSICAS EN BUS 5 –BUS 6.	200
TABLA 17 TABLA ESQUEMA ALIVIO DE CARGA HOLCIM.	215
TABLA 18 AJUSTE PROTECCIÓN RELÉ DIGITRIP3000 (ACTUAL).	244
TABLA 19 AJUSTE PROTECCIÓN RELÉ DIGITRIP3000 (FUTURO).	244

INDICE DE ECUACIONES

ECUACIÓN 1 FALLA MONOFÁSICA:	67
ECUACIÓN 2 FALLA BIFÁSICA:	67
ECUACIÓN 3 FALLA BIFÁSICA A TIERRA:.....	68
ECUACIÓN 4 FALLA TRIFÁSICA:	68
ECUACIÓN 5 ECUACIÓN GENERAL PARA SISTEMAS EN POR UNIDAD	69
ECUACIÓN 6 POTENCIA DE CORTOCIRCUITO.	69
ECUACIÓN 7 POTENCIA DE CORTOCIRCUITO POR IMPEDANCIA DE CABLES.....	70
ECUACIÓN 8 CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO TRIFÁSICO.	70
ECUACIÓN 9 ADMITANCIA DE SECUENCIA POSITIVA.	71
ECUACIÓN 10 MATRIZ Y BARRA.....	71
ECUACIÓN 11 CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO EN CADA BUS.	71
ECUACIÓN 12 VOLTAJE NODALES EN CADA BUS.	72
ECUACIÓN 13 CÁLCULO DE CORRIENTES DE CONTRIBUCIÓN A LA FALLA	72
ECUACIÓN 14 CORRIENTES EN FUNCIÓN DE LAS IMPEDANCIAS.....	72

TEMA: ESTUDIO, DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN NUEVO SISTEMA DE PROTECCIÓN ELÉCTRICA PARA EL MOTOR SÍNCRONO DE 3MW-4,16KV DEL MOLINO DE BOLAS DE CRUDO DE LA FABRICA DE CEMENTO HOLCIM ECUADOR-PLANTA GUAYAQUIL.

Autores: Andrés Fernando Ortiz Boada, aortizb@est.ups.edu.ec
Franklin Agustín Viteri Navarrete, fviterin@est.ups.edu.ec
Director de tesis: Ing. Ervin Solano Villegas, esolano@ups.edu.ec

Palabra Clave: Protección eléctrica, Motor síncrono, Análisis de cortocircuito, Relé de protección de motores.

RESUMEN

El presente trabajo de tesis se realizó específicamente en la Fábrica de Cemento Holcim Ecuador - Planta Guayaquil en el área de Molienda de Crudo durante el periodo 2013-2014 en el cual intervinieron directamente operadores y técnicos encargados del mantenimiento eléctrico.

Debido a constantes pérdida de aislamiento, bobinas quemadas por una mala y obsoleta protección eléctrica del motor síncrono del molino de bolas de crudo¹, que conllevan a costos elevados por reparaciones y pérdidas económicas significativas exigido a falta de producción, se decide realizar un estudio para actualizar e implementar un nuevo sistema de protección eléctrica y evitar daños a personas y a los equipos.

Con este estudio nuestro objetivo principal es garantizar confiabilidad en el motor síncrono y en el sistema eléctrico, actuando sus protecciones eléctricas configuradas del motor en el momento oportuno, evitando reparaciones por una mala y antigua protección eléctrica, para este estudio se necesitó de un software de análisis de cortocircuito ETAP, un analizador de motores PdMA para captar la curva de arranque del motor, relé de protección para motores GE SR469, una unidad de pruebas universal de relés OMICRON CMC 356 y de las normas eléctricas para una eficiente análisis de resultados.

¹ Entiéndase por molino de bolas de Crudo a la máquina para moler diversas materias primas de un subproceso de fabricación de cemento denominado Crudo.

TOPIC: ESTUDIO, DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN NUEVO SISTEMA DE PROTECCIÓN ELÉCTRICA PARA EL MOTOR SÍNCRONO DE 3MW-4,16KV DEL MOLINO DE BOLAS DE CRUDO DE LA FABRICA DE CEMENTO HOLCIM ECUADOR-PLANTA GUAYAQUIL.

Authors: Andrés Fernando Ortiz Boada, aortizb@est.ups.edu.ec

Franklin Agustín Viteri Navarrete, fviterin@est.ups.edu.ec

Thesis director: Ing. Ervin Solano Villegas, esolano@ups.edu.ec

Keyword: Electrical Protection, Synchronous Motor, short circuit analysis, motor protection relay.

ABSTRACT

The present thesis work was conducted specifically for the Cement Factory Holcim Ecuador - Guayaquil Plant in the area of grinding of crude oil during the period 2013-2014 in which directly involved operators and technicians responsible for the electrical maintenance.

Due to constant loss of insulation, coils were burned by a bad and obsolete electrical protection of a synchronous engine of the ball mill of crude oil², which lead to high costs for repairs, and significant economic losses demanded to lack of production, it was decided to carry out a study to update and deploy a new system of electrical protection and to prevent damage to peoples and computers.

With this study our main objective is to ensure reliability of the synchronous engine and in the electrical system, acting their electric protective devices configured for the engine at the right time, while avoiding repairs by a bad and old electrical protection, for this study there was a need for a software analysis of short ETAP, an engine analyzer PdMA to capture the curve to start the engine, protection relay for GE engine SR469, a unit of universal testing of OMICRON CMC 356 relays and electrical standards for an efficient analysis of results.

² I mean by ball mill of crude oil to the machine for grinding various raw materials from a thread in cement production called crude oil.

INTRODUCCIÓN

Un sistema de protección eléctrica bien diseñado y adecuadamente coordinado es indispensable para asegurar que el sistema eléctrico de potencia trabaje dentro de los requisitos y parámetros programados. Al brindarle seguridad a redes eléctricas y equipos costosos, también se está protegiendo una inversión de capital muy grande y a las personas.

La función principal de las protecciones eléctricas es actuar a la desconexión automática de elemento del sistema que ha detectado una falla o régimen anormal de operación, con el objetivo de disminuir los daños de ese elemento y evitar que afecte la operación normal de los otros equipos.

Una función secundaria de la protección es brindar información sobre el tipo y localización de la falla o régimen anormal, con el objetivo de facilitar al personal de mantenimiento eléctrico su rápida localización y eliminación.

Por lo expuesto anteriormente se decide realizar un proyecto en la fábrica de cemento Holcim Ecuador – Planta Guayaquil que consiste en el estudio, diseño e implementación de un nuevo sistema de protección eléctrica para el motor síncrono en el área del molino de bolas de crudo, debido, a su actual sistema están compuestos por relé electromecánicos instalados hace más de 30 años, por lo que no cumple a las exigencias de confiabilidad en el sistema y en el equipo, en reacción a las diferentes fallas que puede estar expuesto el sistema eléctrico.

Para este estudio se decide desarrollar este proyecto, detallado en cinco capítulos:

Capítulo I: Se plantea el problema hallado, se define para su resolución un objetivo general y objetivos específicos, y las posibles hipótesis del proyecto.

Capitulo II: Marco Teórico, conceptos y teorías que se utilizaran para desarrollar y formular la solución al problema que nos llevara a un marco metodológico a seguir.

Capitulo III: Marco metodológico, se detallara el procedimiento de nuestra investigación sustentados por los conceptos descritos en el capítulo anterior.

Capítulo IV: Análisis y resultados, se expone datos actuales del sistema y se toma decisión para implementar el nuevo sistema de protección eléctrica.

Capítulo V: Conclusiones y recomendaciones, se especifica el resultado final del proyecto y se detalla las recomendaciones necesarias para el buen uso del nuevo sistema y se plantea algunas mejoras futuras.



CAPITULO I

CAPITULO I

1 EL PROBLEMA.

1.1 Planteamiento del problema.

En la actualidad las protecciones eléctricas del motor Molino de Bolas de Crudo³, está ubicada en la subestación eléctrica Crudo 1, en su respectivo centro de control de motores (MCC).

Las protecciones del motor están ajustadas por relés electromecánicos independientes, obsoletos e instalados hace 30 años, los cuales no presentan una protección segura y confiable pudiendo llegar a ocasionar fallas inesperadas, daños muy graves al equipo, costos por reparaciones elevados y pérdidas de producción, que se resumirían en pérdidas económicas significativas para el negocio de la empresa.

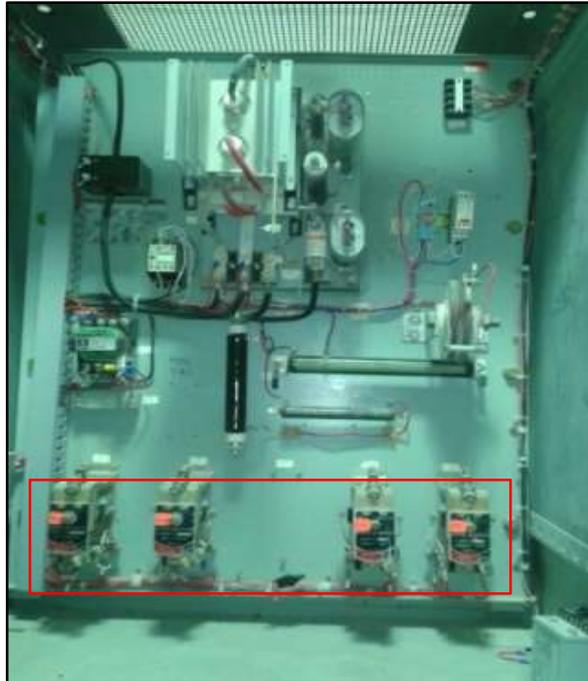
En otro subproceso de la Fábrica de Cementos Holcim, específicamente en el área de Cemento, se cuenta con un molino de bolas de las mismas características y capacidad para moler cemento. En el año 2010 se tuvo un daño en las bobinas del estator del motor, que provocaron averías en el equipo, lo que ocasionó una parada de la línea de producción por 21 días para su respectiva reparación, el motivo del daño, principalmente fue que las protecciones eléctricas del motor no se dispararon en el momento de inicio de la falla.

Por lo expuesto, es de mucha importancia realizar la implementación de las protecciones eléctricas del motor del molino de bolas de Crudo, con el cual se pretende incrementar la confiabilidad del sistema de protección del motor asegurando que ante cualquier anomalía en el proceso, los ajustes de protección respondan de manera rápida y efectiva, evitando daños perjudiciales al equipo, al proceso y al negocio de la planta.

³ Entiéndase por molino de bolas de Crudo a la máquina para moler diversas materias primas de un subproceso de fabricación de cemento denominado Crudo.

A continuación se detalla en la Ilustración los relés de protecciones electromecánicas obsoletos instalados actualmente en la subestación eléctrica del área de Crudo 1.

Imagen 1 Protecciones del motor síncrono molino de bolas de Crudo (2013).



Fuente: Los autores, 2013.

1.2 Tema.

Estudio, Diseño e Implementación de un nuevo sistema de protección eléctrica para el motor síncrono de 3MW - 4.16KV del Molino de Bolas de Crudo de la Fábrica de Cemento Holcim Ecuador - Planta Guayaquil.

1.3 Delimitación del problema.

1.3.1 Temporal.

El proyecto de tesis se lo plantea y ejecuta en el año 2013-2014, se lo sustenta en el año 2014.

1.3.2 Espacial.

El proyecto de investigación se lo efectuará dentro de la Fábrica de Cemento Holcim Ecuador - Planta Guayaquil, considerando para beneficio de la empresa.

1.3.3 Académica.

La delimitación académica es la obtención del título de Ingeniero Eléctrico.

1.4 Objetivos.

1.4.1 Objetivo general.

Incrementar la confiabilidad del equipo y evitar imprevistos que ocasionen costos elevados de reparación, pérdidas de producción y reducción de la vida útil de la maquina por medio del relé de protección eléctrica de motores de media tensión General Electric modelo SR469.

1.4.2 Objetivos específicos.

- Instalar el relé de protecciones General Electric 469.
- Calcular las corrientes de cortocircuito mínimas y máximas del motor del Molino de Bolas de Crudo.
- Programar el relé 469 General Electric para las siguientes funciones:
 - ❖ 50/51 para fases
 - ❖ Desbalance de corriente
 - ❖ Secuencia incompleta de arranque
 - ❖ Protección de baja frecuencia 81
 - ❖ Protección térmica 49
 - ❖ Protección de baja tensión 27
- Simular las protecciones antes mencionadas para la maquina sincrónica.
- Generar las curvas de protecciones del motor síncrono y analizarlas en las diferentes protecciones programadas.

- Diseñar planos eléctricos de la interconexión de control del motor síncrono molino de bolas de Crudo.

1.5 Hipótesis.

La implementación de un nuevo sistema de protección eléctrica para el motor síncrono de 3MW a 4.16kv en el molino de bolas de Crudo de la fábrica de cemento Holcim Ecuador - Planta Guayaquil, permitirá incrementar la confiabilidad del equipo, evitando paradas innecesarias, realizando un oportuno corte del suministro de energía ante un evento de falla, impidiendo que la maquina sufra un deterioro o daño.

1.6 Variables e indicadores.

1.6.1 Variable dependiente (causa).

Implementar el relé de protección eléctrica SR469 de General Electric en el motor síncrono del molino de bolas de Crudo de la planta Holcim en Guayaquil-Ecuador.

1.6.2 Variable independiente (efecto).

Aumentar la confiabilidad en el sistema evitando paros innecesarios por las protecciones obsoletas actuales en el equipo, que conllevan a pérdidas económicas significativas para la empresa.

1.7 Variables intervinientes.

Aumento en disponibilidad del molino de bolas de Crudo de la fábrica de cemento Holcim Ecuador - Planta Guayaquil.

1.8 Indicadores.

Las tendencias del motor se las va a monitorear por la potencia activa del motor síncrono, temperatura del devanado del estator y cojinetes del motor.

1.9 Población y muestra.

Para este proyecto se pretende utilizar información de personal eléctrico con experiencia en protecciones eléctricas en planta (20%), y el personal del área de Crudo (80%). Por medio de su ayuda se realizarán simulaciones de las protecciones eléctricas del equipo con la máquina, para evaluar las condiciones de respuesta de los ajustes programados en el relé de protección a implementar.

1.10 Metodología.

La metodología usada en esta tesis está integrada por varios métodos como son; método científico, método documental bibliográfico, método histórico, método experimental y simulaciones, método analítico sintético.

A continuación se detallan los diferentes métodos con lo que se va a desarrollar nuestro tema de investigación:

1.10.1 Método Científico.

Se basa en el conocimiento e investigación de cómo trabaja un motor síncrono y como configurar sus protecciones eléctricas de acuerdo a los cálculos obtenidos.

1.10.2 Método Documental Bibliográfico.

Se basa en la recopilación de archivos en los datos maestros de la empresa, como son datos nominales de placa del motor síncrono, diagramas eléctricos unifilares, configuraciones de protecciones eléctricas en equipos a intervenir.

1.10.3 Método Histórico.

Se basa en la recopilación de información y registros de fallas de los motores síncronos instalados en la planta.

1.10.4 Método Experimental y Simulaciones.

Se basa en pruebas que se realizará al relé de protecciones de motores con un equipo de inyección de corriente (Omicron) una vez configurada todos los parámetros.

1.10.5 Método Analítico Sintético.

El método analítico se basa en el desglose de las diferentes protecciones del relé de protección que se va a utilizar en el motor síncrono, mientras que el método sintético se resume en la coordinación de estas protecciones para una excelente protección y desconexión en presencia de una falla.



CAPITULO II

CAPITULO II

2 MARCO TEORICO.

En el siguiente capítulo detallaremos los conceptos más importantes, relacionados al motor síncrono, análisis de cortocircuito, relé General Electric SR469 y normativas que nos darán la pauta para diseñar la protección eléctrica al motor síncrono del molino de bolas de Crudo.

2.1 Motor Síncrono.

2.1.1 Introducción al motor síncrono.

Los motores síncronos son máquinas que operan a la velocidad de sincronismo, es decir, que tanto la velocidad del rotor y la velocidad del campo magnético del estator están a la misma velocidad sin existir deslizamiento entre ellos.

Los motores síncronos tienen devanados fijos en el estator conectado eléctricamente al suministro de corriente alterna con una fuente separada de excitación de corriente continua conectada a un devanado de campo en el eje de rotación. Los enlaces de flujo magnético del rotor y los devanados del estator hacen que el motor funcione a la velocidad síncrona.

Aplicaciones en industrias para motores síncronos son utilizados en grandes potencias que requieren de carga variable a una velocidad constante sin deslizamiento, como molino de bolas en industrias de Cemento.

En un motor síncrono operado a velocidad síncrona, es posible variar el factor de potencia del motor variando la alimentación de campo del rotor, debido a la construcción del motor. A continuación revisaremos la construcción del motor síncrono.

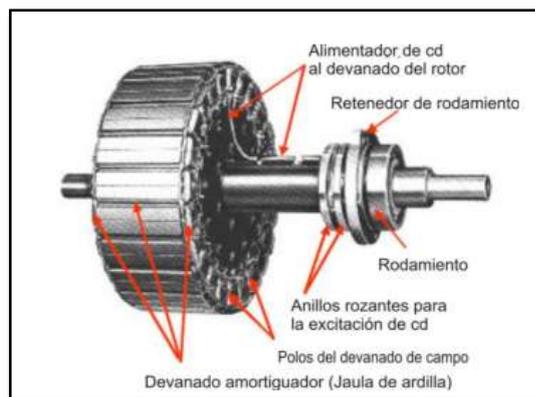
Imagen 2 Motor síncrono de polos salientes planta Holcim-Ecuador.



Fuente: Los autores, 2013

2.1.2 Construcción del motor síncronico.

Ilustración 1 Rotor de motor síncrono.



Fuente: <http://www.kilowattclassroom.com/>

Los motores síncronos tienen las siguientes características:

- Tienen un estator trifásico similar al de un motor de inducción. Son usados por lo general en instalaciones de media tensión.
- Tienen un rotor bobinado (campo rotatorio) que tiene el mismo número de polos que el estator, el cual es excitado por medio de una fuente externa de corriente continua. El rotor puede ser de polos lisos o polos salientes.
- Arranca como un motor de inducción. El motor síncrono tiene también un devanado tipo jaula de ardilla conocido como devanado amortiguador que

sirve para producir la fuerza de torsión para el arranque del motor. (GARCIA, 2013) ⁴

Imagen 3 Motor síncrono molino de bolas de Cemento Holcim.



Fuente: Los autores, 2013

- Un motor síncrono sin una construcción de jaula de ardilla (devanado de amortiguación), podría tener un pobre torque en el arranque.
- La jaula de ardilla de un motor síncrono algunas veces es referida como un devanado de amortiguación, y la razón es desarrollar en el arranque y durante la aceleración, el torque necesario para su funcionamiento. También sirve para amortiguar las oscilaciones de energía mientras alcanza la velocidad síncrona.
- Este devanado es el que produce el torque cuando el motor funciona como un motor de inducción.
- Los motores síncronos funcionan como se mencionó anteriormente a la velocidad de sincronismo de acuerdo con la fórmula:
$$\text{RPM} = (120 \times \text{frecuencia}) / \text{Número de polos.}$$

2.1.3 Principio de funcionamiento del motor sincrónico⁵.

- El devanado amortiguador tipo jaula de ardilla produce el torque de arranque y aceleración del motor, dando como resultado una alta velocidad en el motor.

⁴ GARCIA, H. (2013). *Maquinas Sincronas*. Instituto Tecnológico de la Costa Grande.

⁵ GARCIA, Hector.Op. Cit. pag. (s.f.).

- Cuando la velocidad del motor alcanza aproximadamente 95% de su valor nominal en RPM, la corriente del campo de corriente continua se aplica al rotor produciendo una fuerza de torsión y el rotor disminuirá su velocidad hasta sincronizarse con el campo rotativo del devanado de campo en el estator. El motor girará a la velocidad de sincronismo y producirá fuerza de torsión síncrona.
- Después de la sincronización, la fuerza de torsión no deberá excederse o el motor quedará fuera de sincronismo. Ocasionalmente, si existe sobrecarga momentánea, el motor sufrirá un deslizamiento pero volverá a sincronizarse. Por lo anterior, debe existir una protección ya que si el motor se deja trabajando como motor de inducción, demandará una alta corriente que pudiera dañar el mismo.

2.1.4 Análisis de las formas de arranque y operación del motor síncrono.

Debido a los grandes problemas del motor síncrono en su bajo torque de arranque, se hace necesario llevar al motor a su velocidad síncrona utilizando diferentes métodos de arranque.

Enseguida se indican los principales métodos de arranque para este tipo de motor:

2.1.4.1 Arranque del motor por medio de la reducción de la frecuencia eléctrica.

El propósito de este método es reducir la velocidad del campo magnético del estator. Hasta hace unos años este método era poco usual debido a que como sabemos los sistemas de energía eléctrica tienen frecuencias eléctricas fijas que, en el caso de nuestro país, son de 60 Hz. Sin embargo, hoy día, la situación es diferente debido al gran apogeo de los dispositivos semiconductores de estado sólido que son los encargados de entregar una salida de frecuencia variable mediante una entrada de frecuencia constante.

2.1.4.2 Arranque del motor con un motor primario externo.

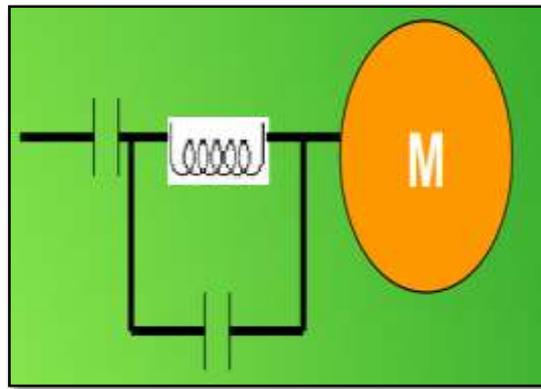
En este método se hace uso de un motor externo de CC o CA que permita arrastrar al motor síncrono hasta la velocidad plena, una vez alcanzada esta velocidad, el motor síncrono se puede conectar en paralelo con el sistema de potencia funcionando como generador, después de esto el motor de arranque es desconectado y la máquina síncrona se comporta ahora como un motor, y está preparado para que se le suministre la carga.

2.1.4.3 Arranque del motor con devanados de amortiguamiento.

Este es el método más popular para el arranque de los motores síncronos, también es conocido como método de arranque de motor síncrono como motor de inducción. Consiste en colocar devanados de amortiguamiento en unas barras localizadas en la cara del rotor y que están en cortocircuito en cada extremo por medio de un anillo.

2.1.4.4 Arranque del motor por voltaje reducido.

Ilustración 2. Esquema de arranque a tensión reducida.



Fuente: T12 motor síncrono.pdf

Motores síncronos conduciendo cargas de bajo torque en el arranque, son frecuentemente puesto en marcha con voltaje reducido, para reducir la cantidad de corriente de la fuente suministradora de energía o corriente de línea.

Reactores conectados en el devanado del estator del motor, usualmente en el neutro, son algunas veces utilizados para reducir la corriente de arranque.

La transferencia al 100% del voltaje de línea es realizada cortocircuitando el reactor. Dado que esto elimina la apertura del interruptor, la perturbación de línea se reduce al mínimo.

La desventaja de usar reactor es que la reducción en el torque del motor es proporcional al cuadrado del voltaje en los terminales del motor, mientras que la reducción in la corriente de línea es solo directamente proporcional a este voltaje. Los kVA adicional los consumen los reactores.

El par de torsión por amperio es por lo tanto menor que cuando son usados autotransformadores.

La secuencia de arranque por voltaje reducido es:

1. Ver que el interruptor de campo esté en posición de descarga.
2. Cerrar el interruptor de arranque.
3. Cuando el motor ha alcanzado una velocidad constante, abra el circuito de arranque y cierre el interruptor de marcha tan pronto como sea posible.
4. Cuando el motor ha alcanzado la velocidad constante una vez más, cierre el interruptor de campo.

Si el motor puede entrar en tensión reducida, el campo puede ser aplicado antes de la transferencia de full voltaje o tensión nominal.

La distorsión de línea es el mismo para cada procedimiento.

2.1.5 Dificultades en el arranque del motor síncrono.

Las razones más comunes para que un motor síncrono falle durante el arranque se detallan a continuación.

1. Bajo voltaje:

- Voltaje de red es bajo.
- Excesiva caída de tensión cuando el motor es puesto en marcha.
- Tap del autotransformador demasiado bajo.

2. Carga excesiva:

- Falla para descargar el motor si este es requerido.
- Fallo para iniciar el sistema de lubricación si es requerido.
- Excesiva tensión de la correa.
- Carga mayor para lo que fue diseñado el motor.

3. Daños al motor:

- Barras rotas.
- Cortocircuito en el devanado del estator.
- Cortocircuito en el campo.

4. Conexión incorrecta:

- Terminales del motor no conectados apropiadamente.
- Motor en una sola fase.

Si el motor arranca pero falla cuando el campo es aplicado, el problema puede ser algunos de los ítems mencionados abajo:

1. Insuficiente excitación de campo.
2. Campo aplicado demasiado pronto.
3. Incorrecto resistor de descarga de campo.

El resistor de descarga de campo recomendado por el fabricante es el mejor valor para el motor bajo las condiciones de operación para lo cual fue diseñado. Si la caída

de voltaje es excesiva durante el arranque, la resistencia de descarga puede ser un poco mayor o sobredimensionada en algunos casos.

Cada motor síncrono es diseñado para operar con una específica carga a voltaje nominal con velocidad adecuada. Frecuentemente, la carga actual es menor que el diseño de carga, y con menor excitación puede ser usado satisfactoriamente. La cantidad de carga a la cual un motor puede ser llevado a paso de un deslizamiento dado es casi proporcional a la excitación de campo.

2.1.6 Torque de salida del motor síncrono.

La máxima carga con la que un motor síncrono puede entregar se llama torque de salida. Esta carga es un mínimo de 150% de full carga para estándar a 100% de factor de potencia y puede ser tan alto como 350% de full carga para aplicaciones especiales.

El torque de salida garantizado de un motor es basado en la excitación a full carga y el voltaje nominal. Cuando cualquier, excitación o voltaje son reducidos, el torque de salida es reducido casi proporcionalmente. Este hecho debe tenerse en cuenta siempre que la excitación de un motor es reducida.

2.1.7 Excitación del motor síncrono.

La mayoría de los motores síncronos funciona con excitación plena carga. A menos que plena carga, el factor de potencia podría ser menor que lo normal y más reactivos kVA podría ser suministrada a la línea. Esto es usualmente una condición deseable.

La excitación puede ser variada para dar cualquier factor de potencia tan grande como la nominal cuando la excitación y corriente nominal de línea no son excedidas.

La excitación muchas veces es alimentada de un breaker trifásico de corriente alterna, para alimentar la excitación del devanado de campo.

2.1.8 Par de reluctancia síncrona.

Un motor síncrono con poca carga conectada a una baja carga de inercia puede llevar al sincronismo antes de que los polos del rotor estén magnetizados externamente. Esto se conoce comúnmente como el par de reluctancia de sincronización. Esta magnetización puede resultar en un par suficiente para mantener los polos salientes en alineación directa con los polos del estator correspondientes y hacer funcionar el motor a velocidad sincrónica. Sin embargo, cuando se aplica la carga, el rotor comienza a deslizarse desde el par desarrollado en sólo una fracción del par nominal bajo excitación separada. Por otra parte, el rotor está polarizado por el flujo del estator, en estas condiciones y por lo tanto puede ser polarizada en cualquier alineación directa del eje.

2.1.9 Torque del motor durante el arranque.

La mayor parte de dificultades en el arranque de motor síncrono se puede evitar si el par de carga, y el voltaje real esperado durante el arranque se informó con precisión al fabricante cuando se ordena el motor.

Los motores síncronos arrancan de la misma manera como motores de inducción, el par de torsión es producido por las corrientes inducidas en el devanado de amortiguación y el circuito de campo.

El motor en ese momento acelera su carga a la velocidad a la cual el par del motor es igual al par de carga. Esta velocidad por lo general debe ser al menos el 95% de la velocidad de sincronismo, llegado a ese punto se aplica la corriente dc a la bobina de campo del rotor, esta corriente dc crea polos de polaridad constante en el rotor, la cual causa que el motor opere a la velocidad de sincronismo.

Existen dos categorías generales de torque para motores síncronos.

Una característica es determinada por el diseño de jaula de ardilla en el devanado de amortiguamiento, la cual produce un torque en relación al deslizamiento.

La primera característica es el torque de arranque, mientras que la segunda característica es referida como el torque síncrono.

La segunda característica es determinada por el flujo en los polos saliente de campo en el rotor.

En el modo de arranque, el motor síncrono de polos salientes no es alimentado por la fuente de excitación dc, si así lo fuera, no habría ningún par útil desarrollado por ello. La razón para esto es que el torque promedio debido a la excitación de campo durante el deslizamiento sería un par negativo o de frenado y por lo tanto podría actuar para reducir la cantidad total de par de aceleración. Además hay un componente muy grande de aceleración de par motor a la frecuencia de deslizamiento producido por el campo de excitación, el cual podría provocar daños en el motor si se aplica corriente de campo durante la secuencia de arranque.

2.1.10 Corriente de arranque.

La corriente de arranque de cualquier motor sincrónico depende del diseño del motor, la tensión aplicada, y la velocidad.

La carga no tiene ningún efecto sobre la corriente de arranque, aunque sí afecta al tiempo de arranque.

Por supuesto, si el motor arranca sin carga, se necesita menos par de aceleración y la corriente de arranque puede ser reducido mediante la aplicación de tensión reducida durante el período de partida o marcha.

La corriente de arranque a voltaje nominal varía de 250% para motores de baja velocidad diseñados para aplicaciones de bajo torque, a 600 o 700% para los motores de las unidades que requieren pares muy altos.

2.1.11 Resistencia de descarga de campo.

Durante el período de arranque, el circuito de campo debería ser cerrado a través de una resistencia de descarga que limita el voltaje a través de los anillos colectores y determina la velocidad en la cual el circuito de campo produce su par máximo.

Si el circuito de campo se deja abierto, esta tensión puede ser más de 10.000 voltios para una máquina grande.

Sin embargo, cuando una resistencia está conectado a través de los terminales de campo, la tensión inducida en reposo se consume principalmente en la caída de reactivo dentro del campo, y sólo aparece la caída de resistencia a través de los terminales.

La resistencia de descarga se especifica generalmente para que la resistencia total del circuito de campo sea de sólo 7% de la reactancia a la frecuencia de línea.

El circuito de campo a continuación, produce su par máximo a aproximadamente 5% de deslizamiento, cuando la resistencia de campo y la reactancia son casi igual.

Esta cantidad de resistencia también limita la tensión a través de los anillos en reposo a menos de 1000 voltios para la mayoría de las máquinas.

Cualquier cambio ordinario en el valor de la resistencia de descarga de campo produce muy poco efecto sobre la corriente total de línea, corriente de campo inducido, y el par motor en reposo, debido a que la resistencia de campo es una pequeña fracción de la reactancia de campo.

Sin embargo, el voltaje a través de los anillos en reposo es casi proporcional a esta resistencia, y el par cerca del sincronismo puede ser afectado considerablemente.

La relación entre la resistencia de descarga de campo más adecuado y el par cerca del sincronismo puede afectar considerablemente.

La relación entre la resistencia de descarga de campo más adecuada y la resistencia del devanado de campo varía en gran medida con el tipo de máquina, y no se puede determinar sin un conocimiento del diseño de la máquina.

2.1.12 Funcionamiento motor síncrono Allis Chalmer molino de bolas de Cemento. ⁶

Imagen 4 Estator y rotor síncrono molino de bolas de Cemento Holcim.



Fuente: Los autores, 2013

Imagen 5 Motor molino de Cemento Holcim.



Fuente: Los autores, 2013

El método más efectivo y ampliamente aplicado de arranque de un motor síncrono es utilizar jaula de ardilla en las caras polares del rotor del motor síncrono.

⁶ General Electric. (2001). *GEH-3133A*.

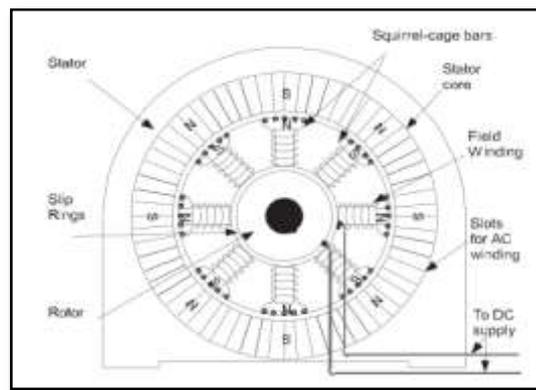
La presencia de estos devanados permite una reacción (o la aceleración) de par a ser desarrollado en el rotor, tal como los devanados del estator excitados en corriente alterna inducen corriente en los devanados de jaula de ardilla.

Por lo tanto, el motor síncrono se inicia como un motor de inducción. Estas bobinas del rotor se refieren con frecuencia como amortiguadores.

La otra función importante de estas bobinas es amortiguar las oscilaciones angulares de energía después de que el motor se haya sincronizado.

A diferencia de los motores de inducción, ningún par de jaula de ardilla se desarrolla a velocidades normales de funcionamiento. Examine la siguiente figura:

Ilustración 3 Partes de un motor síncrono.



Fuente: General Electric GEH-3133A.

Cuando el motor se acelera hasta cerca de la velocidad de sincronización (aproximadamente un 95% la velocidad de sincronismo), corriente continua es introducida en los bobinados de campo del rotor.

Esta corriente crea constantes polos de polaridad en el rotor, haciendo que el motor funcione a la velocidad síncrona.

Los motores síncronos poseen dos categorías generales de par. Una característica es determinada por el diseño de jaula de ardilla, que produce un par, en relación a "deslizamiento" (velocidad distinta a la velocidad síncrona). La otra característica está determinada por el flujo en los polos de campo en el rotor, ya que funciona a la

velocidad síncrona. La primera característica se conoce como el par de arranque, mientras que la segunda característica normalmente se conoce como par síncrono.

En el modo de arranque, los polos salientes del motor no están energizados con su fuente de corriente continua externa. El intento de arrancar el motor con corriente continua aplicado al campo no permite que el motor se acelere.

Además, hay un gran componente oscilante de par a frecuencia de deslizamiento, producida por la excitación de campo, lo que podría dar lugar a daños en el motor si se aplica corriente de campo completo durante toda la secuencia de arranque.

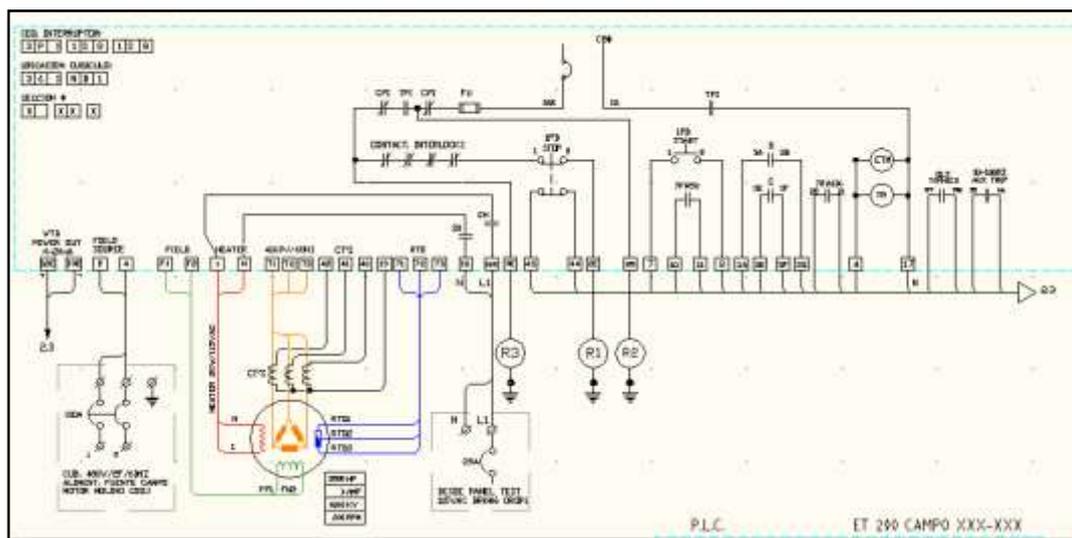
Por lo tanto, la aplicación de corriente directa para el campo, por lo general se retrasa hasta que el motor alcanza una velocidad en la que se puede llevar en sincronismo sin deslizamiento.

A la velocidad sincrónica, los polos del rotor ferro - magnéticas se magnetizan, lo que resulta en un pequeño par de torsión que permite al motor funcionar a cargas muy ligeras en sincronismo sin excitación externa.

El par de reluctancia también puede llevar al motor en paso si está ligeramente cargado y acoplado a baja inercia.

A continuación se detalla el plano de interconexión de control eléctrico del motor síncrono molino de bolas de Crudo.

Ilustración 4 Plano eléctrico motor molino de bolas de Crudo.⁷



Fuente: Holcim-Guayaquil-2012.

En la ilustración 4, se aprecia el plano eléctrico actual del motor síncrono con sus interconexiones e interlocks de protección del equipo, así como su control de arranque y paro del motor.

Una vez implementada y realizada la simulación de protecciones en el nuevo relé de protección a implementar en el motor síncrono, se procederá adicionar el contacto de disparo del relé a la cadena de interlocks de control como se muestra en la ilustración, para garantizar que ante un evento de falla, la protección programada en el relé, se dispare su en el momento oportuno, para evitar daños a equipos y personas que conlleven pérdidas económicas.

⁷ Se puede visualizar en el anexo A la ilustración para su mayor entendimiento.

2.2 Justificación del uso del relé electrónico digital⁸.

2.2.1 Relés electromecánicos de protección.

Estos tipos de relés fueron los primeros en utilizarse en los sistemas de protecciones, y pueden considerarse como los padres de los relés actuales. Fueron empleados durante muchas décadas, realizando una buena cantidad de funciones de protección con relativamente buen rendimiento. Sin embargo, aunque actualmente su labor como relés de protección esté prácticamente extinta, sigue la utilización de algunos de ellos como el relé de armadura basculante (monoestable) o el relé biestable para realizar funciones auxiliares tales como señalización, energización de circuitos, o incluso automatizaciones por medio de lógica cableada.

2.2.2 Relés electrónicos digitales de protección.

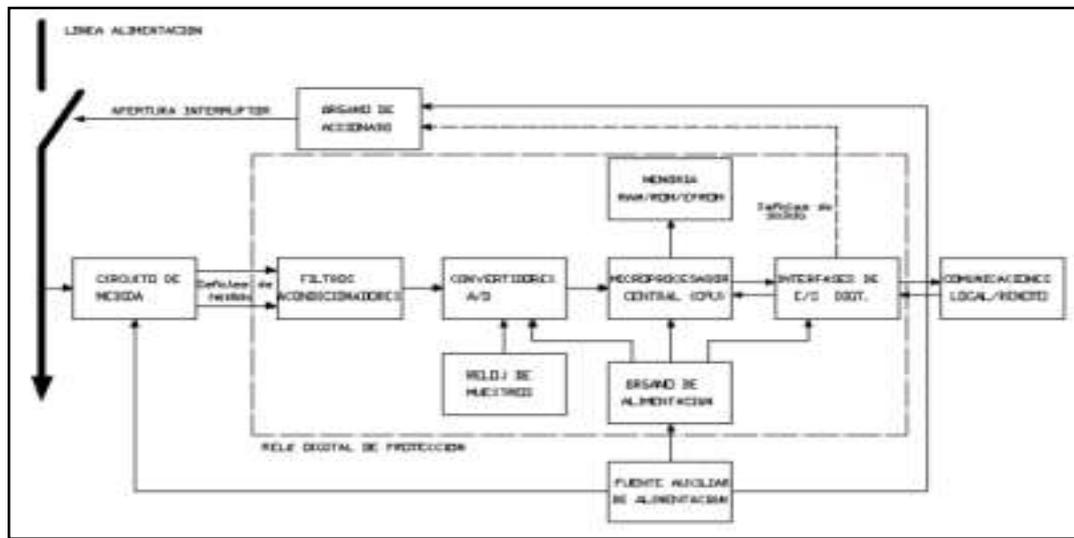
La aparición en el mercado de los primeros microprocesadores, a finales de los años sesenta, impulsó a los grandes fabricantes de protecciones a diseñar sistemas basados en microprocesadores y aprovechar los desarrollos en tecnología de comunicaciones por fibra óptica que transmiten gran cantidad de información a alta velocidad. Las primeras aplicaciones fueron en las protecciones de extremos de línea por ser las más complejas. Posteriormente se han ido extendiendo a otros campos y en la actualidad, es raro el nuevo diseño que no integre microprocesadores en cualquiera de las funciones o equipos de protección.

El esquema básico de las protecciones digitales es muy parecido al de las protecciones estáticas, la diferencia fundamental es que las protecciones estáticas realizan las operaciones de medida (integración, comparación) de forma analógica con valores continuos, mientras que las protecciones digitales la realizan por medio de unos algoritmos que operan con los valores instantáneos muestreados de la señal de entrada.

⁸ FELIZ, J. (16 de 09 de 2009). Justificación y diseño de falsa protección diferencial de barras para S.E Cerro de la Plata. Madrid.

Para ello es necesario disponer de una unidad que realice un muestreo de esta señal y de un convertidor analógico-digital.

Ilustración 5 Esquema de relé electrónico digital.



Fuente: Javier Feliz-2009

El algoritmo es el corazón de la función de protección digital, habiéndose desarrollado y publicado un gran número de ellos. Hoy en día se sigue investigando en este campo desarrollando nuevos algoritmos, ya que la bondad de los mismos se verá reflejada en las características y calidad de las protecciones digitales que los tengan incorporados en sus diseños.

2.2.3 Ventajas.

- Facilidad para incorporar autodiagnósticos y funciones automáticas de inspección, lo cual representa una gran mejora en la fiabilidad y la seguridad del sistema de protecciones. La supervisión continua permite la verificación de los circuitos de la CPU, memorias, dispositivos de ajuste y elementos de entrada y salida.
- Capacidad de almacenamiento de información sobre eventos y ajustes, que puede ser tratada y monitorizada de forma local en la instalación por medio del HMI (Interfaz Hombre Máquina), o de forma remota desde un centro de operación del sistema a través de las RTU (Unidad Remota de Telecontrol).

- Mejora de la flexibilidad y la aplicación. Se pueden normalizar relés con diferentes funciones que compartan el mismo hardware. Una aplicación software determina la función a realizar por el relé. Actualmente están completamente desarrollados los relés de protección multifunción.
- Mayor simplicidad. La complejidad de los actuales sistemas eléctricos requieren cada vez una arquitectura hardware más extenso y complejo en los relés electrónicos convencionales. A través de los microprocesadores en los modernos relés digitales, la arquitectura hardware queda reducida de forma considerable.
- Reducción del conexionado de los equipos. La posibilidad de sistemas de datos jerarquizados en los modernos microprocesadores permite transmitir las distintas señales por el mismo canal de comunicación. La utilización de los modernos sistemas de comunicación y Buses de Campo tales como Profibus, Modbus, Devicenet, Ethernet, conllevan la reducción de cableado de equipos, labores de mantenimiento y mejora las tareas de control y protección.
- Obviamente, debemos tener en cuenta que las ventajas de los relés electrónicos estáticos que antes se han comentado, se aplican también para este tipo de relés.

No obstante quedan aspectos que pueden y deben ser mejorados; así, en el caso de las protecciones; se debe intensificar la investigación y el desarrollo con tecnología digital de nuevos esquemas y algoritmos de protección que satisfagan plenamente los requisitos de los actuales sistemas y redes eléctricas.

Respecto al hardware, las distintas áreas de trabajo se basan en el estudio de la reducción del tamaño de los equipos y en el empleo de modernos microprocesadores y componentes electrónicos capaces de aumentar su velocidad de muestreo y procesamiento de datos. También en el desarrollo de nuevos tipos de transductores y elementos de medida con una baja disipación de potencia y en tecnologías para la inmunidad eléctrica y electrónica ante perturbaciones (ruidos, sobretensiones, interferencias) de los equipos.

Actualmente, en el campo de las protecciones se están desarrollando una nueva clase de relés digitales y dispositivos auxiliares inteligentes (IED's), capaces de desarrollar aplicaciones de alto nivel en el entorno de las comunicaciones y tratamientos de datos. Se está trabajando y de forma muy intensa, tanto en lo relacionado internamente al relé, como en lo externo a él, todo lo que conlleva la integración, automatización, sincronización y arquitectura de los sistemas de protecciones, y en la configuración de modernos sistemas de comunicaciones para grandes instalaciones eléctricas; subestaciones y centrales de generación.

En estos tiempos, se está trabajando de forma muy intensa en nuevos protocolos de comunicaciones, cabe destacar el estándar de comunicaciones IEC 61850, que establece la capacidad de interoperabilidad total entre los equipos de protecciones que comprenden la instalación, tanto los propios relés como los elementos auxiliares, de cualquier fabricante, a través de un bus Ethernet.

Permite simplificar la configuración de los equipos individualmente como la comunicación conjunta, las aplicaciones de alto nivel y una mejora en supervisión y control remota. Este sistema de automatización para las instalaciones eléctricas (Substation Automation System) parece a priori ser el futuro desarrollo de los modernos sistemas de protecciones.

2.2.4 Ventajas del relé digital respecto a relés electromecánicos.

Según varios textos los relés electromecánicos que existen son confiables en su operación, tienen alta durabilidad en servicio, etc. Pero, la tecnología digital (SIEMENS, ABB, GE, por ejemplo) además de las bondades que se mencionan para los relés digitales tienen entre otras y muchas más las siguientes ventajas:

- Utilizan un solo equipo para las tres fases y el neutro, contrario a la mayoría de relés electromecánicos, en el cual generalmente se utiliza un relé para cada fase y otro para el neutro.

- Son relés multifuncionales, es decir, en un solo equipo digital puedes tener funciones de sobre corriente instantánea (50) y temporizada (51), direccional (60), bajo y sobre voltaje (27/59), baja y sobre frecuencia (81), etc., y muchas otras funciones que dependen del tipo de especificación técnica que usted solicite al fabricante.
- Los relés digitales tienen registros de eventos y fallas, medición de parámetros eléctricos en línea, programación y configuración vía software.
- Con la actual tecnología, utilizando protocolo IEC 61850, puedes interrogar los relés de forma remota, es decir, un equipo instalado a larga distancia, puedes acceder a través de puerto Ethernet, y puedes ver y cambiar los ajustes, configuraciones, valores, descargar oscilografía, etc.

Considerando las diferentes ventajas que tiene un relé digital multifuncional contra los relees electromecánicos, se decide instalar el relé para protección de motores de media y alta potencia SR469 de General Electric para nuestro proyecto.

2.2.5 Descripción del relé digital multifuncional General Electric 469.⁹

2.2.5.1 Introducción.

Ilustración 6 Relé digital General Electric SR469.



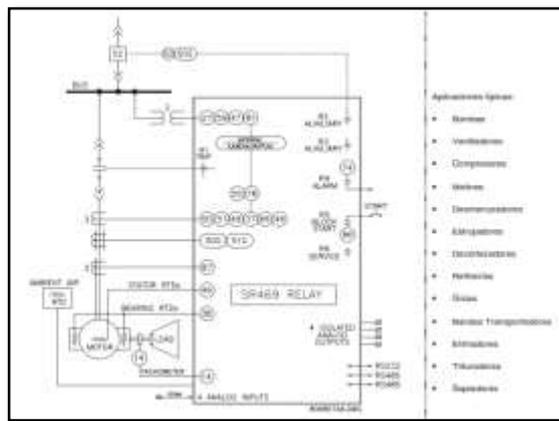
Fuente: General Electric 469man-sp.

El relevador para manejo de motores SR469 está basado en un microprocesador, y ha sido diseñado para la protección y manejo de motores y equipo impulsado de

⁹ General Electric. (2012). *Rele de proteccion SR469*.

mediana y alta capacidad. El SR469 está equipado con 6 relés de salida para disparos, alarmas y bloques de arranque. La protección de motores, el diagnóstico de fallas, la medición de potencia y las funciones RTU están integrados en un paquete económico removible. El diagrama unifilar ilustra la funcionalidad del SR469 utilizando los números de dispositivo de acuerdo a las normas ANSI (Instituto Nacional Americano de Normas).

Ilustración 7 Diagrama unifilar de proteccion del relé SR469.¹⁰



Fuente: General Electric 469man-sp.

2.2.5.2 Características.

Algunas de las características principales de protección son detalladas aquí. Una lista completa puede ser encontrada en la siguiente ilustración.

Las cuatro entradas digitales asignables, pueden ser configuradas para diferentes funciones incluyendo tacómetro o disparo genérico y alarma con nombre programable.

El modelo térmico incorpora polarización desbalanceada, realimentación por RTD y enfriamiento exponencial. Además de las 15 curvas normales de sobrecarga, el SR469 dispone de una curva-usuario-definida y una curva diseñada específicamente para el arranque con cargas de alta inercia, cuando el tiempo de aceleración excede el tiempo de bloqueo permitido. Una segunda curva de sobrecarga es proporcionada para motores de dos velocidades. Las fallas a tierra o fugas a tierra de hasta 0.25A

¹⁰ Se puede visualizar en el anexo A la ilustración para su mayor entendimiento.

pueden ser detectadas utilizando el TC para tierra Multilin 50:0.025. También proporciona entradas de TC para protección diferencial de fase.

Las 12 entradas para RTD que se proporcionan pueden ser individualmente programadas en el campo para diferentes tipos de RTD. Las entradas de transformador de voltaje permiten numerosas características de protección basadas en las cantidades de voltaje y potencia.

Las cuatro entradas analógicas de 4-20mA pueden ser utilizadas para disparo y alarma, relacionadas a cualquier entrada de transductor tales como vibración, presión, flujo, etc.

Ilustración 8 Funciones de protección del relé SR469¹¹.

ANBI		Top	Alarm	Block Stop	Control
51	Sobrecarga	●	●	●	
86	Bloqueo por sobrecarga				
66	Tiempo de arranque y tiempo entre arranques				
	Bloqueo del rearmado				
50	Cortocircuito y respaldo del cortocircuito	●	●		
	Bloqueo mecánico				
37	Mínima intensidad/mínima potencia	●	●	●	
46	Desequilibrio de intensidades	●	●	●	
50G/51G	Falta a tierra y respaldo de falta a tierra	●	●	●	
87	Diferencial	●	●	●	
	Aceleración	●	●		
49	RTD del estator	●	●		
38	RTD de los rodamientos	●	●		
	Otras RTD y RTD ambiente	●	●		
	Alarma temperatura RTD	●	●		
	Baja RTD	●	●		
27/59	Mínima/máxima tensión	●	●	●	
47	Inversión de fase	●	●	●	
81	Frecuencia	●	●	●	
	Potencia reactiva	●	●	●	
55/78	Factor de potencia	●	●	●	
	Entrada analógica	●	●	●	
	Alarma demanda: A kW kvar k VA	●	●		
	Autochequeo del SR469, servicio	●	●		
	Supervisión de la bobina de disparo	●	●		
	Contactador	●	●		
	Fallo del interruptor	●	●		
	Entrada remota	●	●		
14	Entrada de velocidad y disparo por tacómetro	●	●	●	
	Entrada de desastre de cargas	●	●		
	Entrada de presión	●	●		
	Entrada de vibración	●	●		
19	Arranque a tensión reducida	●	●		●
48	Secuencia incompleta	●	●		
	Arranque/paro remoto	●	●		●
	Pir	●	●		

Fuente: General Electric 469man-sp.

Los diagnósticos de fallas son proporcionados a través de la recolección de datos de pre-disparo, del registrador de eventos, de la memoria de rastreo y de estadísticas. Antes de la emisión del disparo, el SR469 tomará una instantánea de los parámetros medidos, los que serán almacenados con la causa del disparo. Estos datos previos al disparo pueden ser ingresados utilizando la tecla [NEXT] antes de la reposición, o revisando los datos del último disparo en los Valores Actuales.

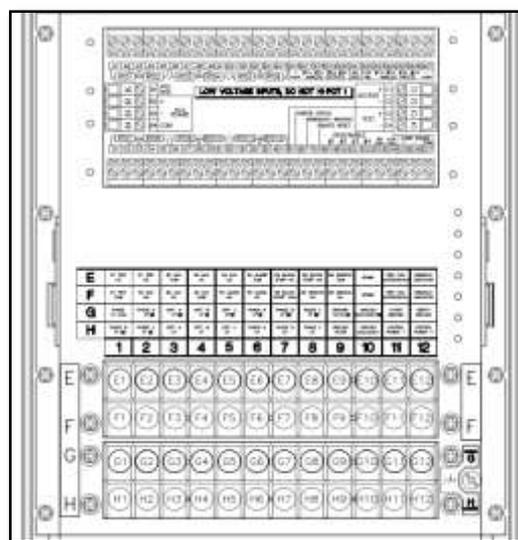
¹¹ Se puede visualizar en el anexo A la ilustración para su mayor entendimiento.

El sistema de registro del SR469 puede almacenar hasta 40 eventos con hora y fecha, incluyendo datos previos al disparo. Cada vez que un disparo ocurre, el SR469 almacenará en memoria 8 ciclos antes y 8 ciclos después del disparo, para todas las cantidades de corriente alterna tomadas. Los contadores de disparos registran el número de ocurrencias de cada tipo de disparo. Valores mínimos, máximos de RTD y entradas analógicas, también son registrados. Estas características permitirán que el operador determine con certeza y rapidez, la naturaleza del problema.

2.2.5.3 Instalación eléctrica.

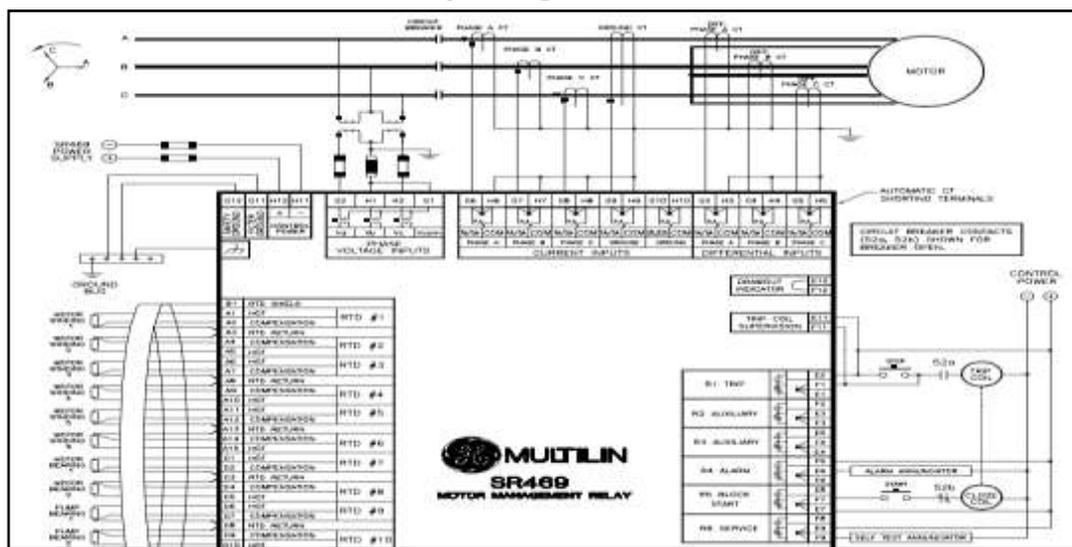
Existe un amplio número de aplicaciones disponibles para el usuario, y no es posible presentar conexiones típicas para todos los posibles proyectos. La información en ésta sección cubrirá los aspectos importantes de interconexiones en las áreas generales de entrada para transformadores de instrumentos, otras entradas, salidas, comunicaciones y conexiones a tierra. Ver ilustración 9 para el arreglo de terminales, y conexiones típicas.

Ilustración 9 Distribución de terminales del relé SR469.



Fuente: General Electric 469man-sp.

Ilustración 10 Diagrama típico de alambrado SR469.¹²



Fuente: General Electric 469man-sp.

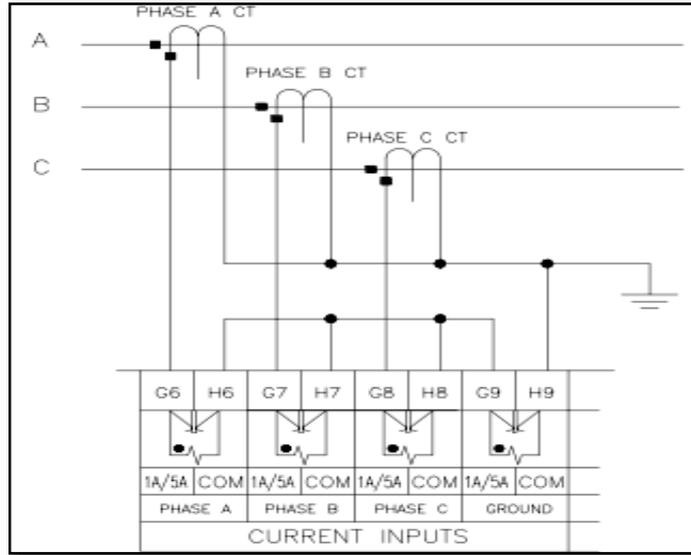
El SR469 tiene tres canales para entradas de corriente de fase, cada una con un transformador de aislamiento. No hay conexiones internas a tierra en las entradas de corriente. Cada circuito TC de fase es cortocircuitado por medio de mecanismos automáticos en el estuche del SR469, si la unidad es removida.

Los TCs de fase deben ser escogidos de tal manera, que la corriente a plena carga (FLA) no es menor que el 50% de la capacidad nominal del primario del TC de fase. Idealmente, el primario del TC de fase debe ser escogido de forma que la FLA es 100% del primario del TC de fase, o un poquito menor, nunca mayor. Esto asegurará una máxima precisión en las medidas de corriente. La corriente del primario del TC de fase máxima es 5000 A.

El SR469 medirá correctamente hasta 20 veces la capacidad nominal de corriente de fase. Puesto que el rango de conversión es grande, los secundarios del TC de 1A o 5A deben ser especificados al hacer el pedido, de tal manera que el TC de interposición apropiado, pueda ser instalado en la unidad. Los TCs escogidos deben ser capaces de conducir la carga del TC de fase del SR469 (Ver especificaciones para capacidades nominales).

¹² Se puede visualizar en el anexo A la ilustración para su mayor entendimiento.

Ilustración 11 Conexión de TC de tierra residual.



Fuente: General Electric 469man-sp.

El SR469 tiene tres canales para entradas AC de voltaje, cada una con un transformador de aislamiento. No hay fusibles internos ni conexiones internas de tierra en las entradas de voltaje. La razón máxima de VT es 150.00:1. Las dos conexiones de VT son delta abierta o en estrella. Los canales de voltaje están conectados internamente en estrella, lo que significa que el puente mostrado en la conexión en delta de la fuente de la Figura 2-13, entre la entrada de fase B y la terminal neutra del SR469, debe ser instalado para VTs en delta abierta¹³.

La polaridad de los VTs es crítica para correctas medida de potencia y operación de fase reversa de voltaje.

¹³ VTs es una abreviación que significa transformadores de voltaje para medición.

2.3.3 Importancia.

Un elemento importante a considerar en la operación de los sistemas eléctricos es su proceder en condiciones normales, sin embargo también es relevante observarlo en el estado transitorio. Esta condición transitoria en las instalaciones se debe a diversas causas y una gran variedad de ellas está fuera del control humano.

Ante fallas inesperadas los equipos y/o sistemas pueden sufrir daños severos temporales o permanentes. Por lo tanto, es necesario definir equipos y esquemas de protección adecuados al momento de diseñar las instalaciones, de tal manera que se asegure el correcto desempeño de la red eléctrica, respaldada por los dispositivos de monitoreo, detección y señalización.

De acuerdo a lo propuesto, se hace necesario realizar estudios de cortocircuito para puntualizar los niveles de corriente ante fallas, las cuales permiten conseguir información necesaria para seleccionar correctamente la capacidad de los equipos en función de los requerimientos mínimos que deben obedecer y así soportar los efectos de las contingencias. Sin embargo, la presencia de fallas es una situación indeseable en un sistema eléctrico, pero lastimosamente no se pueden predecir. Se presentan eventualmente teniendo varios orígenes, por lo que ante estas condiciones, se debe estar en posibilidad de saber las magnitudes de las corrientes de cortocircuito en todos los puntos del sistema.

En general, se puede mencionar que un estudio de cortocircuito sirve para:

- Determinar las capacidades interruptivas de los elementos de protección como son interruptores, fusibles, relés, entre otros.
- Realizar la coordinación de los dispositivos de protección contra las corrientes de cortocircuito.
- Realizar estudios térmicos y dinámicos que consideren los efectos de las corrientes de cortocircuito en algunos elementos de las instalaciones como son: sistemas de barras, tableros, cables, etc.

- Obtener los equivalentes de Thevenin y su utilización con otros estudios del sistema, como son los de estabilidad angular en los sistemas de potencia y ubicación de compensación reactiva en derivación, entre otros.
- Calcular las mallas de puesta a tierra, seleccionar conductores alimentadores.

2.3.4 Características del cortocircuito: asimetría.

Una corriente en régimen normal es una onda senoidal a 60Hz y de amplitud constante, pero cuando sucede un cortocircuito, la onda de corriente sigue siendo senoidal con la misma frecuencia pero va decreciendo exponencialmente desde un valor inicial máximo hasta su valor en régimen estacionario, ya que el cortocircuito es esencialmente de carácter transitorio.

El período de ocurrencia de falla por cortocircuito se divide en una serie sucesiva de intervalos “casi estacionarios”, los cuales son el período subtransitorio, transitorio y estacionario o permanente. Se tiene que tomar en cuenta el concepto de impedancia para determinar la corriente correspondiente a cada uno de estos estados o intervalos. Esta impedancia es variable con el tiempo en las máquinas rotativas.

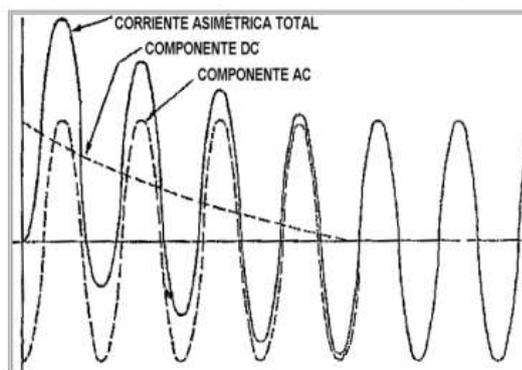
En las máquinas rotativas de corriente alterna generalmente la impedancia puede modelarse como una reactancia inductiva debido a la naturaleza inductiva de sus arrollados, por lo que generalmente se consideran tres reactancias asociadas a cada uno de los intervalos en los que se divide la falla:

- La reactancia subtransitoria X_d'' que es la reactancia aparente del arrollado del estator en el instante del corto circuito y determina el flujo de corriente en los primeros 30 ciclos (hasta $\frac{1}{2}$ segundo) aproximadamente.
- La reactancia transitoria X_d' que determina la corriente durante el período siguiente al subtransitorio y abarca el rango de tiempo entre $\frac{1}{2}$ y 2 segundos después de la ocurrencia del corto circuito.
- La reactancia sincrónica X_s , la cual determina el flujo de corriente cuando se establece el período estacionario.

Dependiendo de la magnitud y desfase en el tiempo entre las ondas de tensión y de corriente de un sistema en el momento de corto circuito, la corriente de falla puede presentar características de asimetría con respecto al eje normal de la corriente; en general esto ocurre cuando la onda de tensión normal se encuentra en un valor distinto a su pico máximo en el momento de ocurrencia de la falla. Para producir la máxima asimetría el corto circuito siempre debe ocurrir cuando la onda de tensión se encuentre pasando por cero. En un sistema trifásico balanceado, la máxima corriente asimétrica ocurre solamente en una de las fases del sistema (cualquiera de las tres).

La asimetría de la corriente de corto circuito surge debido a que la corriente que fluye tiene dos componentes: el componente de corriente alterna y un componente de corriente directa, tal como ocurre en los circuitos RL de corriente alterna. Esta componente de corriente directa decrece a medida que pasa el tiempo ya que su energía se disipa en forma de calor por la resistencia del circuito (efecto Joule). Debido a esto, la relación de decrecimiento es inversamente proporcional a la relación entre la resistencia y reactancia del circuito (X/R), es decir entre más baja es la relación X/R , más rápido es el decrecimiento. Por ejemplo, en sistemas de baja tensión, la relación X/R generalmente es baja, aproximadamente menor a 15, por lo que la componente de corriente directa decae a cero en un rango entre 1 y 6 ciclos dependiendo del caso. Como se observa en la figura, el valor máximo de la corriente asimétrica ocurre cerca del medio ciclo a partir del instante del cortocircuito

Ilustración 13 Asimetría de la corriente de cortocircuito.



Fuente: <http://gama.fime.uanl.mx/>

2.3.5 Fuentes generadoras de corrientes de cortocircuito.

La difusión de las corrientes de cortocircuito depende de las diversas fuentes que las generan, de sus reactancias y de las reactancias del sistema hasta el punto de falla.

Las fuentes de corrientes de cortocircuito son: sistemas de suministro público, generadores, motores síncronos y de inducción.

2.3.5.1 El Sistema de Suministro.

Proporciona energía generalmente a través de transformadores reductores al potencial requerido por el cliente. La Empresa Eléctrica habitualmente proporciona información acerca de su posible corriente de cortocircuito, o potencia de cortocircuito.

2.3.5.2 Los Generadores.

Son fuentes de corrientes de cortocircuito en condiciones de falla, ya que estos son impulsados por motores primarios, como turbinas de vapor o gas, motores diésel y turbinas hidráulicas y cuando se presenta un cortocircuito, la energía primaria impulsa al generador y éste continúa produciendo tensión, ya que la excitación del campo se mantiene debido a la rotación del generador a velocidad nominal.

El potencial generado produce una corriente de gran magnitud que fluye hacia la falla. Solamente la reactancia del generador y la del circuito entre el generador y el punto de falla limitan este flujo. La reactancia de un generador cambia con el tiempo después del inicio de la falla.

2.3.5.3 Motores Síncronos.

Se manifiestan en forma similar a los generadores síncronos. Cuando se produce un cortocircuito el motor síncrono deja de absorber energía del sistema para continuar su rotación y empieza a disminuir su velocidad, pero la inercia de la carga tiende a evitar que esta desaceleración sea muy rápida. De esta manera la inercia hace las veces de un motor primario y dado que la excitación se mantiene, el motor se

comporta como un generador entregando corriente de cortocircuito durante varios ciclos después de que ocurre la falla.

Las reactancias variables de los motores síncronos se designan de la misma manera que las de un generador. Sin embargo, los valores de las reactancias son diferentes. La magnitud de la corriente de cortocircuito debida a los motores síncronos también depende de la capacidad en HP, tensión y reactancia nominal de los motores, así como de la reactancia del sistema hasta el punto de falla.

2.3.5.4 Motores de Inducción.

Aportan corriente de cortocircuito cuando, después de ocurrir la falla, el motor continúa en movimiento debido a la inercia de la carga y el rotor, se comporta como un generador. Pero hay una gran diferencia en la forma en que contribuyen a la corriente de cortocircuito los motores de inducción y los síncronos. El flujo de campo del motor de inducción se produce por la inducción del estator y no por el devanado del campo. Debido a que este flujo disminuye rápidamente después de la falla, la aportación del motor de inducción disminuye también con rapidez y desaparece por completo después de unos pocos ciclos. No hay aportación de corriente de cortocircuito en estado estacionario, y por lo tanto, a los motores de inducción se les asigna solo un valor de reactancia.

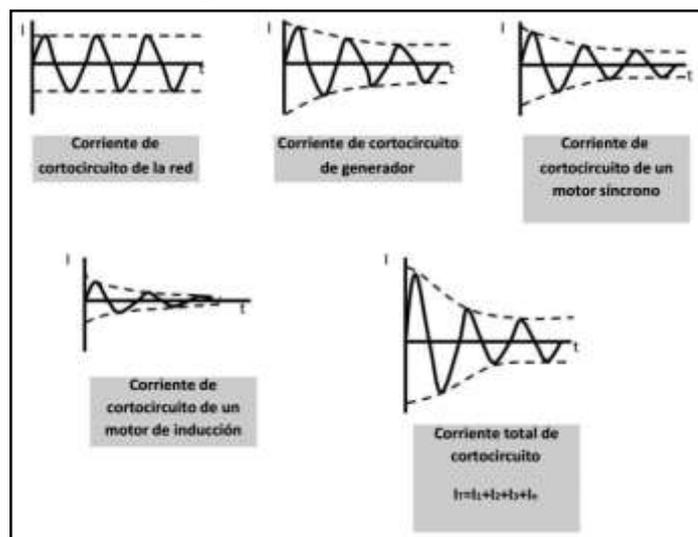
El valor de la reactancia que presenta el motor en el momento que ocurre el cortocircuito es casi igual al de la reactancia presente con el rotor estático. De ahí que el valor simétrico inicial de la corriente de cortocircuito es casi igual al del potencial total de la corriente de arranque del motor, que tiene un valor entre 600 y 900% de la corriente de carga normal. La magnitud de la corriente de cortocircuito que aporta el motor de inducción depende de la potencia, tensión nominal y reactancia del motor, así como de la reactancia del sistema hasta el punto de falla.

En la siguiente figura se representan las formas de onda de las corrientes de cortocircuito con las que contribuye cada uno de los elementos mencionados con anterioridad, con el fin de ilustrar cada una de las corrientes de falla que se suman y proporcionan la corriente de cortocircuito total en el punto de falla de un sistema

eléctrico. Al presentarse el cortocircuito en una instalación, se presentará una corriente de una magnitud muy elevada que se reducirá con el tiempo hasta llegar a un valor permanente, por lo tanto se puede decir que la corriente de cortocircuito tiene las siguientes características.

- Es Senoidal con un periodo dependiente de la frecuencia de la red de alimentación.
- Se va amortiguando con una constante de tiempo que depende de las características de la red de alimentación.
- Contiene una componente asimétrica que depende del desfaseamiento entre la tensión y la corriente en el instante de la falla.

Ilustración 14 Diagrama de cortocircuito de las distintas fuentes.



Fuente: <http://gama.fime.uanl.mx/>

2.3.6 Componentes que limitan la corriente de cortocircuito.

Durante los cortocircuitos; son las impedancias de los transformadores, los reactores, cables, barras conductoras, fusibles limitadores de corriente y cualesquiera otras impedancias del circuito que se encuentren localizadas entre las fuentes aportadoras de corriente de cortocircuito y el punto de falla, los limitadores de corriente de cortocircuito en un sistema eléctrico, la corriente nominal demandada por el mismo es despreciada y las cargas pasivas o que no contribuyen a la corriente de

cortocircuito son eliminadas. A continuación se describen brevemente las características de reactancia que limitan la magnitud de la corriente de falla.

2.3.6.1 Reactancia del Transformador.

Aunque en algunas ocasiones se considera a los transformadores como fuentes de corrientes de cortocircuito, en realidad esto es falso. Los transformadores cambian las magnitudes de tensión y corriente pero no los generan.

La corriente de cortocircuito que se proporciona mediante un transformador depende de la relación de tensión nominal de su secundario y de su porcentaje de reactancia. El porcentaje de reactancia de un transformador es el porcentaje del potencial nominal aplicado al primario del transformador para producir la corriente nominal total de carga en el secundario con cortocircuito. El porcentaje de reactancia es una medida porcentual de tensión, no una impedancia. Debido a su reactancia, los transformadores reducen la magnitud de las corrientes de cortocircuito producidas por las fuentes a las cuales están conectados.

2.3.6.2 Reactores.

Los reactores se usan para limitar las corrientes de cortocircuito mediante la inserción deliberada de una reactancia en el circuito. Sin embargo, los reactores tienen algunas desventajas muy marcadas. Producen caídas de tensión que pueden ser el motivo de disminuciones momentáneas de tensión en el sistema cuando ocurre una falla, o cuando se arrancan los motores de gran capacidad. Pueden afectar desfavorablemente la regulación de tensión y pueden activar los dispositivos de baja tensión, además de consumir energía.

2.3.6.3 Cables.

Los cables y barras conductoras son parte de la conexión entre las fuentes de corriente de cortocircuito y el punto de falla. Su impedancia natural limita la corriente de cortocircuito, y la cuantía de la limitación depende de la naturaleza, calibre y longitud del cable. Algunos diseños de barras conductoras se prestan para

incrementar la impedancia deliberadamente. Los valores de resistencia, reactancia e impedancia de cables y barras conductoras se encuentran en los catálogos de los fabricantes.

2.3.6.4 Fusibles Limitadores de Corriente.

Estos abren el circuito antes de que la corriente de cortocircuito alcance su valor pico. La interrupción sucede generalmente en el primer cuarto del ciclo, el tiempo total de interrupción es la suma de un tiempo de fusión mientras que el elemento del fusible se calienta y se funde, y un tiempo de arqueo luego de que el elemento se funde y los productos gaseosos del arco se enfrían debido a los efectos de los componentes adicionales del fusible. El arco origina impedancia, la cual limita la corriente reduciéndola finalmente a cero. El fusible limitador de corriente tiene una baja impedancia hasta que una corriente muy alta empieza a fluir a través del mismo. Es a la vez un dispositivo limitador de corriente e interruptor de corriente de cortocircuito, mientras que los fusibles disyuntores normales sólo son dispositivos interruptores.

2.3.7 Fallas más comunes en el sistema eléctrico.

Se sabe que normalmente las corrientes de cortocircuito son muy elevadas, entre 5 y 20 veces el valor máximo de la corriente de carga en el punto de falla. Las fallas por cortocircuito se pueden clasificar en dos grandes grupos:

2.3.7.1 Simétricas (balanceadas).

En las fallas simétricas la corriente de las tres fases del sistema son iguales en el instante del corto circuito, por ejemplo:

- ❖ **Cortocircuito trifásico:** Sucede cuando se ponen en contacto las tres fases en un mismo punto del sistema. Es el corto circuito más severo en la mayoría de los casos.
- ❖ **Cortocircuito trifásico a tierra:** Se ponen en contacto las tres fases y tierra en un mismo punto del sistema, es poco probable que ocurra esta falla.

2.3.7.2 Asimétricas (desbalanceadas).

Aquí la corriente en las tres fases del sistema no son iguales en el instante de falla.

Entre éstas fallas tenemos:

- ❖ **Cortocircuito bifásico (fase a fase):** Esta falla aparece cuando se ponen en contacto dos fases cualesquiera del circuito desbalanceando el sistema eléctrico.
- ❖ **Cortocircuito bifásico a tierra (dos fases a tierra):** En ésta sucede lo mismo que en la anterior con la salvedad que también entra en contacto la tierra.
- ❖ **Cortocircuito monofásico (fase a tierra):** Ocurre al ponerse en contacto una fase cualquiera con la tierra del sistema. Esta falla es la más frecuente en las instalaciones eléctricas de tiendas de autoservicio.

Para poder entender cómo se originan estas fallas más a fondo, es necesario echar mano de varias herramientas matemáticas, tales como diagramas unifilares, sistemas en por unidad, las componentes simétricas, diagramas de secuencia, entre otros. Cada herramienta tiene una influencia importante en el estudio de cada falla, así como en los métodos de solución.

2.3.8 Métodos de solución para análisis de fallas de cortocircuito.

Existen diferentes tipos de solución para el análisis de fallas (estudio de cortocircuito), entre los cuales se destacan el método de las componentes simétricas que es un método exacto, pero que comúnmente se confunde con el método denominado por unidad. A continuación se describe una lista de los métodos más conocidos.

- Método de las componentes simétricas (método exacto).
- Método porcentual (método por unidad).
- Método de MVA's (método de las potencias).
- Método de la matriz Zbus (método exacto).

- Método por software.

2.3.8.1 Método de las Componentes Simétricas.

Este método se basa esencialmente en el desarrollo de las componentes simétricas y su relación con las redes de secuencia. Se toman en cuenta las siguientes consideraciones:

- Dibujar un diagrama correspondiente al punto de falla en donde se muestren las conexiones de las fases en dicho punto, se indicarán corrientes, voltajes, impedancias considerando su polaridad y direcciones.
- Escribir las ecuaciones que relaciona los voltajes y corrientes conocidas para el tipo de falla en estudio.
- Transformar corrientes y voltajes del punto anterior de fases abc a secuencias 012.
- Examinar corrientes de secuencia para determinar la conexión apropiada de las terminales F y N de las redes de secuencia para satisfacer las condiciones del punto 3.
- Examinar los voltajes de secuencia para obtener la conexión apropiada de las terminales F y N de las redes de secuencia para satisfacer los puntos 3 y 4.

Después de realizar los puntos anteriores, se obtienen diferentes ecuaciones de cálculo de la corriente de falla en análisis, entonces:

Ecuación 1 Falla monofásica:

$$I_{a_0} = \frac{E a_1}{Z_1 + Z_2 + Z_0};$$

$$I_a = 3I_{a_0}$$

Ecuación 2 Falla bifásica:

$$I_{a_1} = \frac{E a_1}{Z_1 + Z_2};$$

$$I_b = -I_c = -j\sqrt{3}I_{a_1}$$

Ecuación 3 Falla bifásica a tierra:

$$I_{a_1} = \frac{E_{a_1} Z_2}{Z_1 Z_2 + Z_2 Z_0 + Z_0 Z_1};$$
$$I_b + I_c = 3I_{a_0}$$

Ecuación 4 Falla trifásica:

$$I_{a_1} = \frac{E_{a_1}}{Z_1};$$
$$I_a = I_{a_1}$$

Además de las consideraciones anteriores y de las ecuaciones mencionadas, este método debe en primera instancia definir una potencia base en MVA o kVA y un voltaje base en kV y posteriormente convertir todas las impedancias del sistema a valores por unidad en dichas bases. Inmediatamente después se debe realizar una reducción de todas las impedancias a una sola en el punto de falla, es decir aplicar el teorema de Thevenin al sistema.

2.3.8.2 Método por Unidad.

Este método como ya se mencionó en ocasiones se confunde con el anterior, debido a que su procedimiento es muy parecido. Se basa principalmente en encontrar valores en por unidad de todos los equipos que se encuentren en el sistema, por lo que el procedimiento se reduce a encontrar la reactancia equivalente del sistema según las leyes de los circuitos eléctricos, las resistencias particulares de cada elemento significativo del sistema.

Para cada punto de falla previsto deberá resolverse la red resultante, no olvidando considerar las reactancias de máquinas rotatorias que sea necesario incluir en el sistema, dependiendo del número de ciclos en que se desee calcular la corriente de corto circuito. En circuitos de alta y media tensión, es de interés conocer la corriente

momentánea (1/2 a 1 ciclo) y la corriente para interrupción (8 ciclos), en tanto que en baja tensión solo la corriente momentánea es de interés.

El método basa sus cálculos en la ecuación general para sistemas en por unidad y es:

Ecuación 5 ecuación general para sistemas en por unidad

$$\text{valor por unidad} = \frac{KV}{KV \text{ base}}$$

Este método es generalmente el más apropiado cuando en el circuito existen diversos niveles de voltaje.

El número base es también llamado valor unidad ya que en el sistema de “por unidad” tiene un valor unitario. Así, una tensión base es también llamado tensión en unidad. El símbolo que se usa para expresar valores en “por unidad” es X, usando también la abreviatura “pu” como subíndice de la magnitud en cuestión Xpu.

2.3.8.3 Método por MVA’S.

Este método es usado en donde se requiera no ser considerada la resistencia de los elementos que integran el sistema, ya que resulta ser un método aproximado. El desarrollo de este método se basa en los siguientes pasos:

- La impedancia del equipo deberá convertirse directamente a MVA de corto circuito por la ecuación, si la reactancia del equipo está en % o por la ecuación, si la reactancia está en por unidad.

Ecuación 6 Potencia de cortocircuito.

$$MVAcc = \frac{(MVAequipo) \times 100}{\% X \text{ del equipo}}$$

$$MVAcc = \frac{MVAequipo}{Xpu \text{ del equipo}}$$

- La impedancia de líneas y alimentadores (cables) deberá convertirse directamente a MVA de corto circuito por medio de la ecuación, si la reactancia de la línea está en Ohms.

Ecuación 7 Potencia de cortocircuito por impedancia de cables.

$$MV_{Acc} = \frac{KV^2}{X_{ohms}}$$

Donde se observa que los kV son los correspondientes a los de línea-línea del cable.

- Dibujar dentro de rectángulos o círculos todos los MVA de corto circuito de equipos y alimentadores siguiendo el mismo arreglo que éstos tienen en el diagrama unifilar.
- Cambiar los valores de MV_{Acc} del sistema hasta encontrar un valor equivalente en el punto de falla, considerando que los valores en serie se combinan como si fueran resistencias en paralelo y los valores que estén en paralelo se suman directamente.
- Reducir el diagrama unifilar (ya con los cambios del punto anterior) como si fuera una red de secuencias del método de componentes simétricas.
- Con el valor encontrado en el paso anterior, se calcula la corriente de corto circuito trifásico de la siguiente manera:

Ecuación 8 Corriente de cortocircuito trifásico.

$$I_{cc} = \frac{(MV_{Acc}) \times 1000}{\sqrt{3} \times (KV)}$$

Donde se observa que los kV son los correspondientes a los de línea-línea en el punto de falla.

Cabe mencionar que, este método solo se aplica a una falla trifásica, ya que para una monofásica el procedimiento se complica demasiado.

2.3.8.4 Método de la Matriz ZBUS.

Este método al igual que el de las componentes simétricas se considera un método exacto. El desarrollo de este método solo se ha aplicado a falla trifásica, pero se puede aplicar a cualquier falla. Se trata de encontrar la matriz de impedancias Zbus y

esto se logra obteniendo la matriz de admitancias Ybus, entonces el procedimiento es el siguiente:

- Calcular las admitancias de secuencia positiva de las ramas del circuito de impedancias, en por unidad, por la medio de la ecuación:

Ecuación 9 Admitancia de secuencia positiva.

$$Y_{ij} = \frac{1}{Z_{ij}}$$

Dónde: Z_{ij} = Impedancia entre los nodos i y j.

- Se forma la matriz de admitancias Ybus, de secuencia positiva por inspección de la red.

Ecuación 10 Matriz Y barra.

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2n} \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix}$$

Dónde: n es el número de buses.

Los elementos de la diagonal principal: Y_{11} , Y_{22} , Y_{nn} , etc. Se obtienen sumando todas las admitancias que estén conectadas al bus correspondiente. Mientras los elementos fuera de la diagonal principal se obtienen o son todas las admitancias que unen a dos buses pero con signo combinado.

- Se calculan las corrientes de corto circuito en cada bus:

Para el bus k:

Ecuación 11 Corriente de cortocircuito en cada bus.

$$I_x = \frac{V_k}{Z_{kk}}; \quad K = 1, 2, 3, \dots n$$

V_k = Voltaje de pre falla (E_{a1}) en el bus k.

- Se calculan los voltajes nodales en todos los buses del sistema cuando ocurre la falla en el bus k, es decir, para el bus “n” cuando ocurre la falla en el bus

“k”:

Ecuación 12 Voltaje nodales en cada bus.

$$V_n = V_{pn} - \frac{Z_{nk}}{Z_{kk}} = V_{pn} - Z_{nk} I_k$$

Dónde:

V_{pn} = Voltaje de pre falla en el bus “n”.

- Se calculan las corrientes en las ramas al ocurrir la falla (cálculo de corrientes de contribución a la falla):

Ecuación 13 Cálculo de corrientes de contribución a la falla

$$I_{ij} = \frac{V_i - V_j}{Y_{ij}} = Y_{ij} (V_i - V_j)$$

Dónde:

V_i = Voltaje en el bus “i” cuando ocurre la falla en el bus “k”

V_j = Voltaje en el bus “j” cuando ocurre la falla en el bus “k”

Y_{ij} = Impedancia primitiva de la línea entre los buses “i” y “j”

Y_{ij} = Admitancia de la línea entre los buses “i” y “j”

Si se calculan las corrientes sólo en función de las impedancias:

Ecuación 14 Corrientes en función de las impedancias.

$$I_{ij} = \frac{(Z_{ij} - Z_{jk})x V_k}{(y_{ij})(Z_{kk})}$$

Dónde:

Z_{ik} se obtiene de la matriz Z_{bus} .

Z_{jk} se obtiene de la matriz Z_{bus} .

Z_{kk} se obtiene de la matriz Z_{bus} .

Como se logra observar, este método es más complicado que los anteriores, de aquí su poca aplicación en los sistemas de baja tensión.

2.3.8.5 Método por Software.

Este método está restringido al software que se maneje, ya que cada fabricante ocupa distintos parámetros de diseño y configuraciones de su sistema.

Cabe señalar que aun cuando se diseñe muy cuidadosamente un sistema eléctrico, este estará siempre expuesto al daño que puedan causar flujos de corriente en condiciones de cortocircuito tales como sobrecalentamientos y arcos eléctricos destructivos. Para asegurar que los equipos de protección puedan aislar fallas rápidamente y minimizar el daño de cada uno de los componentes del sistema de potencia y el riesgo del personal, el estudio de corrientes de cortocircuito debe ser incluido en el diseño de los sistemas eléctricos de baja tensión y también cuando se hagan modificaciones a los sistemas existentes.

2.4 Referencia el uso de la normativa en la protección del motor síncrono estándar IEEE C37.96.¹⁴

2.4.1 Resumen.

Se proporcionan métodos generalmente aceptados de protección de motores de corriente alterna. En esta guía se identifica y resume las funciones necesarias para la adecuada protección de los motores basados en el tipo, tamaño y aplicación. Esta guía no pretende detallar los requisitos de protección de todos los motores en cada situación.

2.4.2 Documentos estándares IEEE.

Las normas desarrolladas en IEEE representan un consenso de la amplia experiencia en el tema dentro del Instituto, así como las actividades fuera de la IEEE que han expresado su interés en participar en el desarrollo de la norma.

Esta guía se puede utilizar en conjunción con las siguientes publicaciones. Cuando las normas siguientes son reemplazadas por una revisión aprobada, se aplicará la revisión.

¹⁴ IEEE. (2000). IEEE Guide for AC Motor Protection.

ANSI C50.10-1987, Requisitos generales para máquinas síncronas (IEC 34-1-1969).
IEEE Std C37.100-1992, Definiciones estándar IEEE para switchgear.
ANSI C50.10-1987, General Requirements for Synchronous Machines (IEC 34-1-1969).
ANSI C50.41-1982, American National Standard for Polyphase Induction Motors for Power Generating Stations.
ANSI/NEMA ICS 1-Rev. 2 (1990), General Standards for Industrial Control. ANSI/NEMA ICS 2-1988, Industrial Control Devices, Controllers, and Assemblies. ANSI/NFPA 70-1999, National Electrical Code® (NEC®).
IEEE Std C37.010-1999, IEEE Application Guide for AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis.
IEEE Std C37.2-1996, IEEE Standard Electrical Power System Device Function Numbers and Contact Designations.
IEEE Std C37.13-1990 (Reaff 1995), IEEE Standard for Low-Voltage AC Power Circuit Breakers Used in Enclosures.
IEEE Std C37.100-1992, IEEE Standard Definitions for Power Switchgear.
IEEE Std C37.101-1993, IEEE Guide for Generator Ground Protection.
IEEE Std C37.102-1995, IEEE Guide for AC Generator Protection.
IEEE Std C62.2-1987 (Reaff 1994), IEEE Guide for the Application of Gapped Silicon-Carbide Surge Arresters for Alternating Current Systems.
IEEE Std C62.22-1997, IEEE Guide for the Application of Metal-Oxide Surge Arresters for Alternating- Current Systems.
IEEE C62.92.1-1987 (Reaff 1993), IEEE Guide for the Application of Neutral Grounding in Electrical Utility Systems, Part I—Introduction.
IEEE Std 242-1986 (Reaff 1991), IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems (IEEE Buff Book).
IEEE Std 522-1992 (Reaff 1998), IEEE Guide for Testing Turn-to-Turn Insulation on Form-Wound Stator Coils for Alternating-Current Rotating Electric Machines.
IEEE Std 620-1996, IEEE Guide for the Presentation of Thermal Limit Curves for Squirrel Cage Induction Machines.
NEMA AB1-1993, Standards for Molded Case Circuit Breakers.
NEMA FU1-1986, Standards for Low-Voltage Cartridge Fuses.

NEMA MG1-1998, Motors and Generators.

NEMA MG10-1994, Energy Management Guide for Selection and Use of Polyphase Motors.

NEMA SG3-1995, Standards for Low-Voltage Power Circuit Breakers, Section SG3, 28-9.5, Application of Fused Circuit Breakers to Full-Voltage Motor Starting and Running Duty of Three-Phase, 60 Hz Motors.

2.4.3 Glosario de terminología para motores.

Para propósitos de esta guía, se detalla los siguientes términos y definiciones. Estos términos y definiciones que son comúnmente utilizados en la industria y se encuentra tanto en la IEEE 100-1996 [B152] 4 y NEMA MG-1-1998. IEEE 100 -1996 debe ser referido para los términos no definidos en esta cláusula.

1. Límite térmico de aceleración: El límite de la relación tiempo-corriente basado en el límite de la temperatura admisible del rotor durante el proceso de aceleración (arranque).
2. Curva de aceleración tiempo-corriente: La característica de curva de arranque versus curva de tiempo representa la aceleración del motor a una tensión aplicada.
3. Par de aceleración: El par neto entre la capacidad de par motor y el par de carga durante el proceso de arranque, lo que acelera el motor y la carga a la velocidad de operación
4. Par máximo: El par máximo que un motor se desarrollará con la tensión nominal a la frecuencia nominal, donde no se produzca una caída abrupta de la velocidad.
5. Devanado amortiguador limitado: Un motor síncrono que es térmicamente limitada por su devanado amortiguador.
6. Devanado de campo: consta de bobinado conectado a una fuente de corriente continua y produce el principal campo electromagnético del motor.
7. Carga de alta inercia : Una carga que tiene un momento de inercia que excede los valores normales , tal como se describe en NEMA MG -1- 1993 para que el motor necesita ser diseñado para tener tanto la capacidad térmica y

mecánica para acelerar la carga a velocidad de funcionamiento sin exceder sus límites .

8. Par de carga: El par requerido por equipos accionados mecánicamente a través de la gama de velocidades de operación.
9. Corriente de rotor bloqueado: La corriente del motor de estado estacionario a rotor bloqueado, cuando se suministra desde una fuente de tensión y frecuencias nominales.
10. Impedancia de rotor bloqueado: La impedancia en los terminales del motor durante la condición de rotor bloqueado.
11. Límite térmico de rotor bloqueado (tiempo permisible de calentamiento): El tiempo de seguridad máxima admisible contra corriente de rotor bloqueado que circula por los bobinados a la tensión y frecuencia nominales.
12. Par de rotor bloqueado: El par mínimo que un motor desarrollará en reposo, para todas las posiciones angulares del rotor, a la tensión y la frecuencia nominal.
13. Pérdida de sincronismo (fuera de paso): Una condición que existe cuando la máquina síncrona ha perdido sincronismo con respecto al sistema de suministro.
14. Capacidad de par del motor: La capacidad de par del motor, suministrada con tensión nominal y la frecuencia en todo el rango de velocidad de funcionamiento, durante los procesos de arranque y funcionamiento.
15. Pull - in par: El par máximo constante de un motor síncrono en las que el motor va a llevar su carga de inercia conectado en sincronismo, a la tensión y frecuencia nominales, cuando se aplica la excitación.
16. Par pull-up: El par mínimo desarrollado por el motor durante el período de aceleración desde el reposo a la velocidad a la que se produce par máximo.
17. Rotor: El componente de rotación de un motor de corriente alterna que contiene el devanado de campo, que pueden ser de bobinado o del tipo de jaula de ardilla. En el caso del motor síncrono, el devanado de campo se pueden energizar a partir de una fuente de corriente continua.
18. Rotor limitado: Un motor que está térmicamente limitada por su sistema de rotor.

19. Capacidad térmica en modo marchando: Un gráfico de tiempo máximo permitido vs porcentaje de la corriente nominal que circula en el devanado del motor cuando el motor esté en marcha.
20. Factor de servicio: Un multiplicador que, cuando se aplica a la potencia nominal, indica una carga de potencia admisible que se pueda realizar en las condiciones especificadas por el factor de servicio.
21. Ciclo de deslizamiento: Cuando un motor síncrono se desliza fuera de paso (pérdida de sincronismo) en completo 360 grados con respecto a la fuente de alimentación.
22. Corriente de arranque: La corriente requerida por el motor durante el proceso de arranque para acelerar el motor y la carga a la velocidad de funcionamiento. Máxima corriente de arranque a la tensión nominal se dibuja en el momento de la puesta en tensión.
23. Tiempo de arranque: El tiempo requerido para acelerar la carga a la velocidad de funcionamiento.
24. Par de arranque: La capacidad de par nominal del motor durante el arranque a tensión y frecuencia nominales.
25. Estator: El componente estacionario de un motor de corriente alterna que contiene el devanado del inducido y el núcleo del estator.
26. Estator limitado: Un motor que está térmicamente limitado por su sistema de estator.
27. Devanado de jaula de ardilla: Un circuito del rotor que consiste en barras conductoras, conectado con un anillo en cada extremo, que constituyen el devanado del rotor.

Se inducen voltajes en este circuito que, a su vez, produce el flujo de corriente. La interacción entre los campos del estator y el rotor crea el par electromagnético del motor.
28. Curva de límite térmico (frío): Un gráfico de tiempo máximo admisible frente al porcentaje de la corriente nominal que fluye en el devanado del motor cuando el motor se pone en marcha desde la temperatura ambiente.
29. Curva de límite térmico (caliente): Un gráfico de tiempo máximo admisible frente al porcentaje de la corriente nominal que fluye en el devanado del motor cuando el motor se pone en marcha desde la temperatura nominal de funcionamiento.

30. Devanado del rotor bobinado: el circuito del rotor en un motor de inducción de rotor bobinado, que consiste en un devanado polifásico que transporta la corriente alterna producida por inducción.

2.4.4 Descripción del equipo.

2.4.4.1 Motores síncronos.

Los motores síncronos polifásicos tienen estatores y los devanados del estator (bobinas de la armadura) similares a las de los motores de inducción. El rotor del motor síncrono, sin embargo, difiere considerablemente de la del motor de inducción. El rotor tiene polos salientes, por lo general, correspondientes al número de polos del estator bobinado. Los polos se enrollan con muchas vueltas de alambre y se hace circular una corriente continua a través de la bobina para crear polos de flujo magnético que alterna de norte a sur.

La excitación de corriente continua puede ser aplicada a los devanados de campo a través de escobillas y anillos colectores, o por medio de un sistema de excitación sin escobillas que consta de un excitador de corriente alterna, rectificador, y el equipo de control montado en el elemento giratorio.

Para arrancar un motor síncrono, normalmente es necesario disponer de un número de barras incrustados en la cara de cada polo, cortocircuitado en cada extremo para formar una jaula de ardilla (llamado bobina de amortiguación) similar a la encontrada en el motor de inducción.

Por otra parte, el devanado de campo debe ser desconectados de la fuente de corriente continua y en cortocircuito, por lo general por medio de un resistor de descarga de campo apropiada durante el arranque (es decir, el motor síncrono se inicia normalmente como un motor de inducción).

Las diferencias entre el control y protección del motor, del motor síncrono, en comparación con el motor de inducción, están relacionados con la construcción del

rotor. Puesto que se requiere de corriente continua de excitación para el funcionamiento síncrono, es fundamental para el motor, protección contra la pérdida de campo y pérdida de sincronismo.

Durante el arranque, el equipo de control requiere generalmente asegurar, de forma automática y precisa, que la velocidad del rotor alcance un valor apropiado antes de aplicar la excitación de corriente continua.

La capacidad térmica del rotor de un motor síncrono y su tiempo de bloqueo permisible (tiempo de calentamiento permisible), son generalmente mucho menor que la de un motor de inducción, y se debe proporcionar protección especial para el devanado amortiguador.

Sin embargo, en el estator del motor síncrono, sus cojinetes, son esencialmente los mismos que los del motor de inducción, los sistemas de protección para estas partes son básicamente los mismos.

2.4.4.2 Conmutación y control.

Todos los motores requieren las siguientes funciones para incorporarse a su equipo de control y conmutación:

- Medios de desconexión del estator.
- Dispositivo de despeje de fallas del estator.
- Dispositivo de conexión del estator.

Varios dispositivos utilizados para estas funciones se describen a continuación, Todas las tres funciones se pueden proporcionar en un solo dispositivo. En algunas aplicaciones, se pueden requerir dos o tres dispositivos.

2.4.4.3 Tipo de control de switchgear.

Interruptores de circuito de potencia se pueden utilizar para el control del motor, desconexión del estator, de interrupción de fallas, y las funciones de conmutación.

Normas están disponibles para cubrir las aplicaciones y las limitaciones de los interruptores de potencia de corriente alterna. Por ejemplo, ANSI C37.16-1988 muestra la aplicación de baja tensión en disyuntores de alimentación de corriente alterna para el arranque y marcha de un motor a pleno voltaje alimentado de una red trifásica a 60 Hz, 40 ° C.

2.4.4.4 Equipos de conmutación de campo.

Todos los motores síncronos están provistos de algún tipo de equipo de aplicación de campo para aplicar la fuente de corriente continua en el punto apropiado (tiempo o velocidad).

El control de esta fuente de alimentación debe estar integrado con el control del estator. Para motores más pequeños, los contactores se utilizan para conectar la fuente de alimentación en el campo. En los de mayor tamaño, pueden ser necesarios los interruptores de campo.

2.4.4.5 Equipo de control del estator.

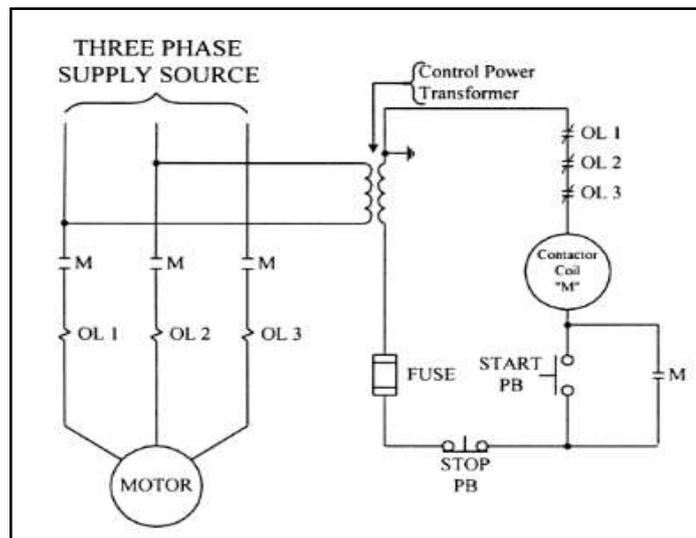
La protección contra pérdida de baja tensión es una característica inherente del tipo no enclavamiento de controladores de motores de corriente alterna. Estos dispositivos no están diseñados para liberar en cualquier nivel específico de tensión.

Una medida de protección contra baja tensión de línea está disponible porque los contactores se mantienen cerrados por el potencial tomado directamente de la línea de motor o de un transformador de control. Los contactores de línea debe estar cerrado en 85% de la tensión nominal de línea, de acuerdo con la norma ANSI / NEMA ICS 2-1988, 110.41 (b), mientras que el punto de caída no está definido y puede variar de 20% a 70% de la tensión nominal (típicamente 70%).

El contactor de línea debería abrir si existe un hueco de tensión o una completa pérdida de tensión mientras el motor está en marcha.

2.4.4.5.1 Control por tres hilos con protección contra la pérdida de la tensión.

Ilustración 15 Circuito de control de tres hilos con protección contra la pérdida de la tensión (Control de campo no se muestra).



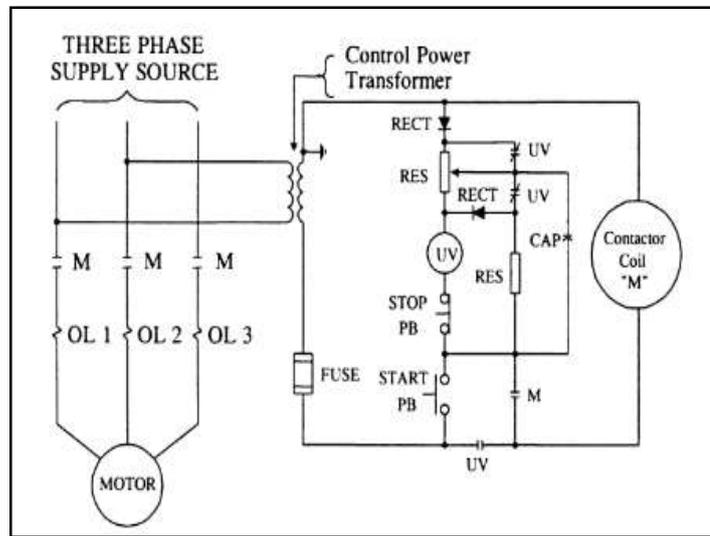
Fuente: IEE Std C37.96-200.

Cuando se usa el circuito mostrado en la figura, el contactor (M) se mantiene a través de un contacto auxiliar en paralelo con el botón de arranque. Si el contactor se abre debido a la baja tensión de la línea, el circuito de la bobina, se abre por el contacto auxiliar de control, y el motor no puede arrancar hasta que se acciona el botón de arranque.

Este tipo de protección se conoce como control de tres hilos con protección de pérdida de tensión. Durante una condición de bajo voltaje de la línea, un motor síncrono actúa como una fuente de potencia reactiva por un período corto de tiempo y, por lo tanto, tiende a mantener su tensión en los bornes de corriente alterna por un período considerablemente más largo que un motor de inducción.

2.4.4.5.2 Control por tres hilos con el tiempo de retardo de la protección de pérdida de tensión.

Ilustración 16 Protección del circuito de control de tres hilos con el tiempo de retardo de pérdida de tensión.



Fuente: IEE Std C37.96-200

Cuando se desea asegurar que el motor continúe funcionando durante caídas de tensión o interrupciones de corta duración, un circuito de control similar a la mostrada en la figura puede ser utilizado.

Esto se conoce como control de tres cables con protección de pérdida de tensión con retardo de tiempo, que consiste en una mínima tensión del relé a un retraso de tiempo (UV) que mantiene un contacto enclavado por un período determinado después de un fallo de tensión.

2.4.4.6 Equipos de control de campo.

La conmutación de campo de un motor síncrono se complica por el hecho de que el campo puede ser cualquiera de los siguientes:

- a) Un campo de tipo escobilla (es decir, una alimentación suministrada a través de los anillos deslizantes en el eje y las escobillas) que deriva su corriente continua de:

1. Una excitación dc por eje impulsado.
2. Un conjunto de motor - generador separado.
3. Un rectificador estático separado.

b) Un campo de tipo sin escobillas que requiere:

1. De excitación de corriente continua para el campo de un excitador de corriente alterna giratorio.
2. Excitación de corriente alterna para el primario de un transformador giratorio.

En general, el circuito de aplicación de campo debe:

1. Proporcionar una fuente de descarga de la corriente alterna inducida en el campo del motor durante el arranque. Este circuito puede requerir la apertura del circuito de resistencia de descarga de campo, cuando se aplica la excitación dc al circuito.
2. Aplicar campo a una velocidad adecuada (95 % a 99 %) y (con algún equipo) en una posición favorable de los polos del rotor con respecto al flujo giratorio.
3. Eliminar automáticamente el campo en motor fuera de paso.

2.4.4.6.1 De tipo escobilla (anillos colectores).

Un control típico de un motor síncrono de tipo escobilla es mostrado en la figura, los detalles de la operación varían con el equipo en particular, suministrado por diferentes fabricantes y con diferentes aplicaciones de motor. La secuencia general de funcionamiento es el siguiente: Cerrar el botón de arranque activa la bobina del contactor de línea-(M), que conecta el estator del motor a la línea de corriente alterna y el contacto auxiliar de (M) enclava el circuito.

detectado por la bobina (56ac). Este relé se desactivará cuando el intervalo de tiempo entre la media onda de corriente de campo inducida rectificado excede el ajuste del relé. Esto ocurre en 94 % a 98 % de la velocidad síncrona, momento en el que sus contactos se cerrarán, energizando el contactor de campo (41).

2.4.5 Requisitos de protección del motor síncrono.

2.4.5.1 Fuera de paso y protección de motor bloqueado.

2.4.5.1.1 Pérdida de sincronismo del motor síncrono (pullout).

Cuando un motor síncrono pierde sincronismo con respecto al sistema de frecuencia a la cual está conectado, esto es referido como fuera de paso (out of step). Esta condición ocurre cuando las siguientes acciones toman lugar individual o en grupo:

- a) Carga excesiva en el eje.
- b) La tensión de alimentación se reduce excesivamente.
- c) La excitación del motor es demasiado baja.

Pulsaciones de par de torsión aplicado al eje de un motor síncrono son también una posible causa de la pérdida de sincronismo.

Una causa frecuente de pérdida de sincronismo es un fallo que se produce en el sistema de suministro. Tiempo de despeje de fallas, ubicación o tipo de error, y la configuración del sistema son factores significativos relacionados con la estabilidad del motor.

Subexcitación de la máquina es una causa común de operación fuera de paso. Esto puede ser causado por incorrectos disparo del disyuntor de circuito de campo del rotor (o contactor), o por la apertura o cortocircuitos en el circuito de campo.

Cuando la pérdida de sincronismo (pullout) se produce, y el motor no es separado del sistema en el primer polo de deslizamiento, la excitación de campo debe ser desconectado y el campo conectado a la resistencia de descarga inmediatamente.

Esto reduce al mínimo la corriente que fluye hasta que el motor se puede aislar. El motor a continuación, debe ser aislado tan rápidamente como sea posible, porque esto no es una condición aceptable de funcionamiento a largo plazo.

2.4.5.1.2 Medidas eléctricas cambiantes durante un atascamiento o parada (stall condition).

Para un motor síncrono, la pérdida de sincronismo es un fenómeno en evolución gradual en lugar de un suceso instantáneo. Durante la fase inicial de la pérdida de sincronismo, la corriente del estator incrementa, la tensión en sus terminales disminuye, y se induce una tensión en el circuito del rotor a la frecuencia de deslizamiento. El flujo de potencia en el motor aumenta hasta que se alcanza un ángulo de aproximadamente 90° entre la tensión de la máquina equivalente y la tensión del sistema.

2.4.5.1.3 Dispositivos de protección para detectar condiciones anormales del motor.

La detección de atascamiento (Stall) de un motor de inducción se suele realizar mediante un relé de sobrecorriente, con una característica inversa para detectar corriente por encima del nivel de par máximo. En casos donde los motores apliquen cargas de alta inercia, la protección de sobrecorriente puede necesitar ser combinado con interruptores de velocidad, relés de distancia, o adicionar la protección térmica del rotor para proteger totalmente el motor.

Dispositivos de detección de fuera de paso para los motores síncronos suelen operar en el ángulo del factor de potencia del estator. Dispositivos del tipo de impedancia son habilitados para la detección de la pérdida de campo, y que pueden también ser configurados para operar en condiciones fuera de paso sin falla de campo, donde la reactancia transitoria del motor supera la impedancia del sistema visto desde los terminales del motor (el caso habitual).

Para grandes motores síncronos o condensadores sincrónicos, un relé de pérdida de campo se utiliza a menudo para detectar el flujo de VAR en la máquina. Disparo

accidental del breaker de campo del rotor o corriente de pérdida de campo se puede detectar con precisión por este dispositivo.

Un dispositivo sensor de corriente alterna en el circuito de campo del rotor también puede detectar la condición de fuera de paso del motor. Estos dispositivos utilizados en el circuito de campo del rotor por lo general consisten en un transformador de corriente (CT) con un relé de corriente alterna en el secundario. Cuando la máquina está funcionando sincrónicamente, no hay ningún componente de corriente alterna de la corriente de campo del rotor, y, por lo tanto, no hay corriente en el relé. Si la máquina está fuera de paso con el sistema, una corriente de frecuencia de deslizamiento existe, y si es de magnitud suficiente, el relé se activa. Durante el período de arranque, este relé debe ser bloqueado. Este sistema no se adapta a los motores con un esquema de excitación sin escobillas.

2.4.6 Protección al devanado del estator.

2.4.6.1 General.

El deterioro del sistema de aislamiento eléctrico de los devanados del estator es una causa común de la reducción de la vida del motor. Esto puede deberse a numerosas causas, como someter el aislamiento a la humedad, exceso de tensión dieléctrica y daños mecánicos o térmicos.

Las propiedades físicas y el dieléctrico de un sistema de aislamiento se deterioran con la edad, y como otra actividad química, este proceso se acelera por una elevación de la temperatura. Una regla de oro se ha desarrollado a partir de las pruebas y la experiencia para indicar que la vida de un sistema de aislamiento es de aproximadamente la mitad por cada 10 ° C de aumento gradual de la temperatura del devanado, y aproximadamente el doble por cada 10 ° C que disminuye (en el rango de 7 ° C -12 ° C es indicado para los sistemas modernos de aislamiento). Por lo tanto, la vida del aislamiento está relacionada con la longitud de tiempo que el aislamiento se mantiene a una temperatura dada.

En la práctica, las fallas en devanados que resultan de la ruptura dieléctrica se suelen atribuir a condiciones tales como impulsos o picos de tensión de conmutación, la humedad, la penetración. Esfuerzos mecánicos, tales como fuerzas de vibración o deformación, también pueden causar fallos en los devanados. Estas fuerzas se producen con mayor frecuencia cuando se arranca el motor, o, posiblemente, durante el traslado a otra fuente de energía eléctrica. Independientemente de la razón asociada con la falla, el efecto de la elevada temperatura es reducir la capacidad del aislamiento para soportar el abuso eléctrico o mecánico.

El nivel de temperatura a la cual un sistema de aislamiento debe estar protegido, está sujeto a criterios técnicos y las normas aplicables. (Para conocer los límites establecidos por la industria del motor, consulte NEMA MG1- 1998, los artículos 12,41, 12,42, y 12,52. En motores asíncronos, consulte NEMA MG1- 1998, en el artículo 20.40. En los motores sincrónicos, consulte NEMA MG1- 1998, en el artículo 21.40.)

2.4.6.2 Sobrecargas en el motor.

Las sobrecargas pueden producir temperaturas de punto caliente en el estator superior a los límites térmicos diseñados del sistema de aislamiento del bobinado. Sin embargo, en todos los casos de operación que resultan en exceso de temperatura, el tiempo es un factor importante. La capacidad de almacenamiento de calor de un motor de inducción es relativamente grande. Sobrecarga leve durante períodos cortos de tiempo no resulta en variaciones de temperatura perjudiciales, debido a que el calor adicional se almacena en la masa del conductor y el núcleo. En contraste, para las condiciones de rotor bloqueado, la tasa de aumento de la temperatura es muy rápida debido a grandes corrientes. Dado que se transmite muy poco calor (en este corto intervalo de tiempo) de los conductores a las partes más grandes del motor, los límites térmicos del aislamiento del devanado pueden alcanzar tiempos en segundos.

2.4.6.3 Ventilación inadecuada.

Inadecuada ventilación resulta de una reducción del flujo de enfriamiento a las partes del motor a la cual el calor debe ser eliminado. Los motores operados con

circulación de aire obstruidos o conductos de ventilación parcialmente obstruidas pueden haber restringido el enfriamiento y por lo tanto el motor se calienta. Del mismo modo, pantallas, filtros o dispositivos en la corriente de aire del motor pueden obstruirse y reducir el flujo de refrigeración. Con la ventilación bloqueada, un motor operando incluso sin carga puede estar sujeto a altas temperaturas destructivas. Insuficiencia de ventilación puede ser detectada por el flujo de aire, la presión, o dispositivos de detección de la temperatura del devanado del motor, y la acción alarmante o disparo puede ser iniciado.

2.4.6.4 Condiciones ambientales inusuales.

Motores y controles, así como dispositivos de sobrecarga separados, normalmente se califican para el uso en un máximo de temperatura ambiente no superior a 40 ° C. En las zonas donde la temperatura ambiente en el motor, controles, o ambos sea superior o sensiblemente inferior a la máxima temperatura ambiente nominal, consideraciones especiales puede ser requerida, tal como se describe en los párrafos siguientes.

Cuando la ventilación media de un motor aumenta en temperatura, el devanado del motor y la temperatura del rotor también aumentarán. Operar el motor a una temperatura superior a la temperatura ambiente nominal, a pesar de que su carga este por debajo de la carga nominal, se puede someter los bobinados del motor a una sobre temperatura similar a la que resulta de una operación de sobrecarga a temperatura ambiente nominal. La potencia del motor debe reducirse apropiadamente para operar en altas temperaturas ambiente.

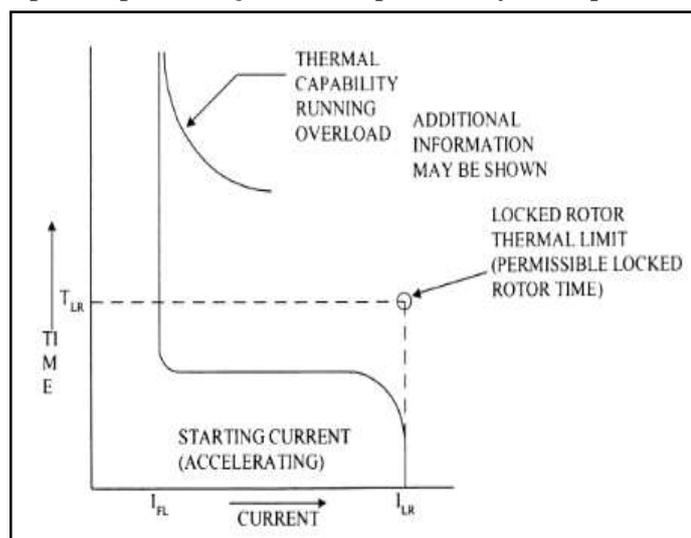
2.4.6.5 Fallo de rotor bloqueado o de aceleración.

El fallo de un motor para acelerar cuando se energiza su estator puede ser causado por varios tipos de condiciones anormales, incluyendo un fallo mecánico de los cojinetes del motor o de la carga, baja tensión de alimentación, o un circuito abierto en una fase de una alimentación de tensión trifásica. Cuando el bobinado del estator del motor es energizado con el rotor estacionario, el motor funciona como un transformador con resistencia de carga en el devanado secundario. Típicamente, la corriente del estator puede variar de tres a siete o más veces el valor de plena carga

nominal, dependiendo del diseño del motor y de la impedancia del sistema de alimentación. El controlador del motor debe ser capaz de interrumpir la corriente de rotor bloqueado. Véase la ilustración 12 y la ilustración 13 para ejemplos típicos de las curvas de tiempo-corriente que indican el arranque (aceleración), límite térmico de rotor bloqueado, límite térmico de aceleración, y curva de sobrecarga en motor marchando. En la ilustración 12, el límite térmico del rotor bloqueado es un único punto para la condición de 100 % de tensión en los bornes del motor.

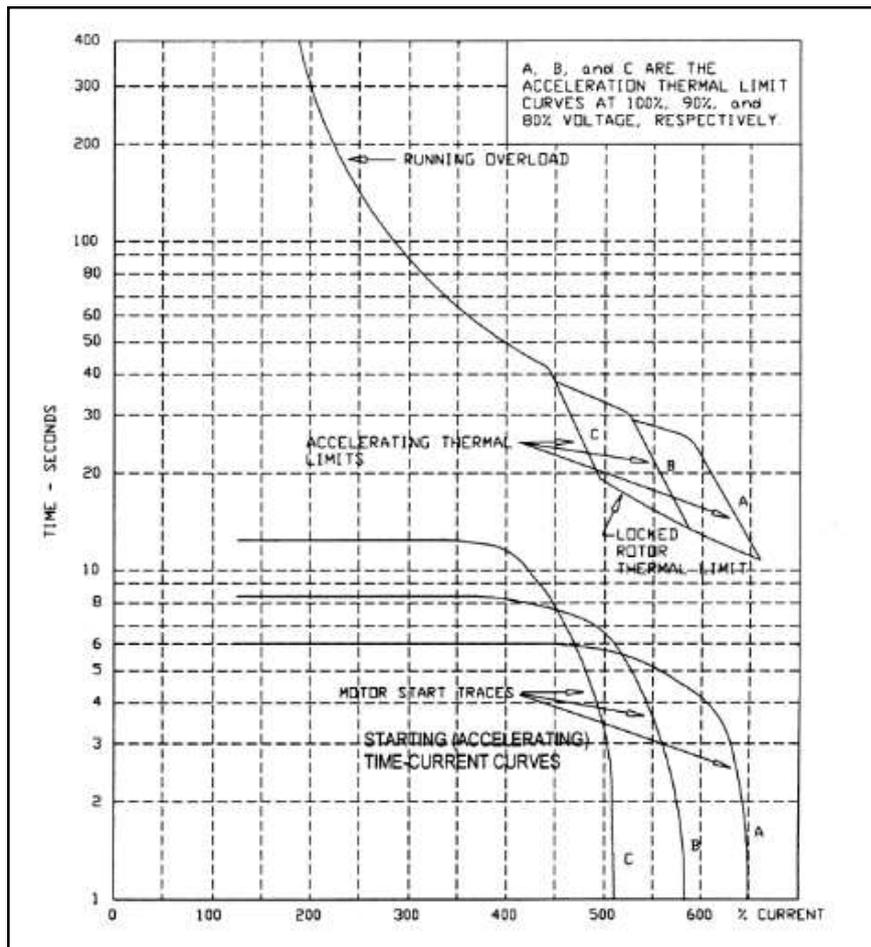
Durante el arranque, el efecto de la piel debido a la operación de frecuencia de deslizamiento, hace que la resistencia del rotor muestre un alto valor de rotor bloqueado, que disminuye a un valor de corriente bajo a la velocidad nominal de deslizamiento. Usando una típica corriente de rotor bloqueado de seis veces la corriente nominal y la resistencia de rotor bloqueado de tres veces el valor normal de funcionamiento, el efecto de calentamiento I^2R se estima en $6^2 \times 3$, o 108 veces mayor que en la corriente normal. I^2R define el efecto de calentamiento y I^2t define la capacidad térmica. En consecuencia, una temperatura extrema debe ser tolerada por un tiempo limitado para arrancar el motor. Exceso de temperatura se puede prevenir mediante la detección de la magnitud de la corriente de línea y la interrupción de la energía cuando el tiempo de arranque es excesivo.

Ilustración 18 Típico arranque de motor y curva de capacidad térmica.
(Aplicado para voltaje de motor particular y arranque en frío).



Fuente: IEE Std C37.96-2000

Ilustración 19 Curva típicas de tiempo-corriente y límites térmicos.
(Adaptado de IEEE Std 620-1996).



Fuente: IEE Std C37.96-2000

Dependiendo del diseño, un motor puede ser limitado térmicamente por el estator o rotor durante las condiciones de aceleración o de rotor bloqueado. Las curvas de límite térmico del rotor bloqueado permitido y el límite térmico de aceleración deben obtenerse para el arranque a temperatura ambiente (arranque en frío) y temperatura de operación (arranque en caliente). Se requiere que la curva de tiempo-corriente de aceleración (de arranque) se trace en el mismo gráfico como las curvas de límite térmico por lo menos a 80% y 100% de la tensión nominal (ver IEEE Std 620-1996).

Los tiempos de arranque varían dependiendo el diseño del motor y las características de par de carga. Los tiempos pueden variar desde menos de dos segundos a más de 60 segundos y deben ser determinados para cada aplicación.

son igual a la energía cinética almacenada en las piezas giratorias a velocidad sincrónica.

En repetidos arranques y funcionamiento intermitente, como arranques fallidos, el periodo de marcha es corto, así que el poco calor es disipado por el aire de enfriamiento inducido por la rotación del rotor. Arranques repetidos pueden acumular valores de temperaturas peligrosamente altas en el bobinado del estator o del rotor, o ambos, a menos que disponga de tiempo suficiente para permitir que el calor se disipe.

Funcionamiento intermitente repetitivo en motores eléctricos puede causar stress mecánico en la bobina del estator y del devanado amortiguador o en las conexiones finales del rotor devanado. NEMA MG1- 1998, en el artículo 12.50, recomienda reducir al mínimo el número de arranques para maximizar la vida útil del motor. Para la operación en automático (y en algunos casos, en operación manual) con un dispositivo de control remoto, puede ser necesario proporcionar un intervalo de tiempo fijo entre arranques, o limitar el número de arranques dentro de un período de tiempo para garantizar una operación segura.

2.4.6.7 Dispositivos de protección térmica por sobre temperatura (49).

Hay dos clases principales de dispositivos de protección térmica por exceso de temperatura. La primera trata de un tipo de apertura de línea, ya que interrumpe la corriente de carga directa. El segundo es un sistema de circuito de control utilizando dispositivos detectores, que interrumpe la corriente del motor a través de su controlador.

Protectores térmicos están destinados a limitar la temperatura y corriente del bobinado del estator a valores predeterminados durante condiciones de funcionamiento anormales del motor. Esto impide el fallo del aislamiento prematuro en el motor.

Condiciones anormales que pueden resultar en un sobrecalentamiento incluyen sobrecargas, atascamiento, fallos en el arranque, una temperatura ambiente elevada,

la ventilación del motor limitada, velocidad de operación muy bajo, arranques frecuentes, voltaje o frecuencia de línea alta o baja, fallo mecánico de la carga accionada, instalación incorrecta y el voltaje de línea desbalanceado.

La detección de corriente por sí solos no puede detectar algunas de estas condiciones, tales como la ventilación restringida. Sensores de temperatura pueden ser inadecuados, por ejemplo, con arranques frecuentes. Para algunas condiciones, puede ser necesaria una disposición coordinada de detección de corriente y de temperatura.

La capacidad de detección de temperatura de los sensores térmicos depende de su ubicación con respecto a los devanados del motor. Los sensores deben instalarse dentro o en la carcasa del motor de tal manera que la temperatura en el dispositivo cambia de forma proporcional a la temperatura del devanado, y deben corresponder a la clase de aislamiento del motor.

2.4.6.8 Protección ofrecida por los relés térmicos.

La mayoría de los motores de inducción están protegidos contra daños causados por desbalance de tensión, sobrecarga, y ya sea por una condición de atascamiento por relés térmicos adecuadamente seleccionados (dispositivo 49) en cada fase. Sin embargo, el calentamiento del rotor en algunos motores de inducción de grandes potencia, y en todos los motores síncronos, es más crítica. Tales máquinas pueden justificar la inversión adicional en el control para detectar desequilibrio de tensión, tal como un relé de tensión de fase (dispositivo 47) o relé de corriente de secuencia negativa (dispositivo 46), para proporcionar una protección específica contra el sobrecalentamiento del rotor. El NEC requiere un elemento térmico por fase para la protección de todos los motores trifásicos a menos que esté protegido por otros medios aprobados.

2.4.6.9 Los motores que operan en sistemas sin conexión a tierra.

Cuando el neutro de un sistema no está conectado a tierra, es posible que destructivas sobretensiones transitorias que son algunas veces normal a aparecer de línea a tierra durante el switcheo de un circuito que tiene una falla en línea-a-tierra. La magnitud

específica de la tensión sería dictado por la topología de circuito (relación X / R). Estas sobretensiones pueden causar fallos en el aislamiento del devanado del estator de los motores en el sistema. Por esta razón, es prudente identificar y aislar las fallas a tierra a la mayor brevedad posible.

2.4.6.10 Protección térmica del rotor de un motor síncrono.

Protección térmica del rotor para motores síncronos incluye lógicamente ambos el devanado de campo de excitación y el devanado amortiguador o devanado de jaula. El devanado de campo no es normalmente monitoreado su temperatura durante la rotación. Sin embargo, si se desea, la temperatura del devanado de campo se puede determinar para motores de tipo escobillas (anillos deslizantes) por el método de aumento de resistencia; una evaluación precisa de la resistencia en del rotor se puede obtener usando la tensión de las escobillas y la corriente de campo. Una tolerancia para la caída de tensión en las escobillas se puede hacer para mejorar la precisión.

El devanado amortiguador de un motor síncrono o el devanado de jaula de un motor de jaula de ardilla realizan la función de iniciar la carga y por lo tanto deben ser protegidos contra los daños. En condiciones de estancamiento, altas temperaturas peligrosas en el devanado de amortiguación pueden llegar en unos segundos. Temperatura excesiva puede dañar el material del devanado amortiguador, cambiando así sus características físicas. Repetidos excesos de estrés térmicos pueden hacer que las barras y anillos terminales de cortocircuito, o las juntas soldadas entre sí, se puedan romper.

Para la mayoría de las máquinas síncronas, el tiempo de bloqueo permisible del rotor es demasiado corto para utilizar un dispositivo de detección de temperatura de devanado del estator para proporcionar una protección tanto de rotor y el estator. Este tipo de máquina es típicamente limitado térmicamente por el devanado amortiguador. El uso de un tiempo largo del relé de sobrecorriente del estator, puede proporcionar protección térmica del rotor. También hay otros dispositivos disponibles, como el relé térmico del devanado amortiguador (dispositivo 26).

Mientras marcha el motor, las temperaturas excesivas en las partes del rotor de los motores sea síncronos o asíncronos pueden ser resultado de corrientes desbalanceadas (secuencia negativa). Guía para la reducción en motores de inducción y síncronos debido a desequilibrio de tensión se proporciona en NEMA MG -1- 1993 Parte 20 y 21, respectivamente. Corrientes de secuencia negativa reduce el par de aceleración disponible. Esto alarga el tiempo de aceleración, y contribuye al recalentamiento del motor.

Operación de motores síncronos que usa la potencia reactiva del sistema más allá de su capacidad reactiva puede dar lugar a un sobrecalentamiento en algunas partes del estator y el rotor que normalmente no transportan corriente (calentamiento del hierro y la redistribución de las corrientes de pérdida de carga por dispersión). Algunos relés de pérdida de campo (40) pueden detectar este fenómeno.

2.4.7 Protección contra fallas del estator.

2.4.7.1 Consideraciones generales.

La corriente que fluye a un fallo dentro de un motor puede variar en gran medida su magnitud. Los principales factores que afectan a la magnitud de las corrientes de defecto son la fuente, alimentador del motor, y la impedancia de puesta a tierra; el tipo de fallo (fase o tierra), y la ubicación de la falla en el devanado del motor.

En el caso de corrientes de cortocircuito de alta magnitud, el aislamiento inmediato del motor es siempre necesario. Sin embargo, cuando la corriente de falla es de pocos amperios y el motor es crítico, una alarma sin disparo inmediato del circuito en algunas ocasiones se justifica.

2.4.7.2 Efectos del sistema y características del motor.

En los sistemas con baja impedancia de la fuente (alta corriente de fallo), hay poca dificultad para los relés de protección en distinguir entre carga, arranque, y corrientes de cortocircuito. En los sistemas conectados a tierra a través de una resistencia o impedancia, la corriente de falla a tierra es aproximadamente igual a la tensión de pre-falla a tierra en el punto de fallo, dividido por la impedancia de puesta

a tierra o neutro. En un sistema sólidamente conectado a tierra, la corriente máxima de falla a tierra es del mismo orden de magnitud que la corriente de fallo de tres fases, asumiendo impedancia de falla cero para fallas cerca de la fuente de tierra.

Fallos internos en los motores suelen ser de línea a tierra o línea a línea, con o sin la participación de tierra. Fallas trifásicas que no implican tierra son más probables que ocurra cerca de los terminales de la línea. Fallas pueden ocurrir entre espiras en la misma fase, o entre devanados paralelos en la misma fase de un devanado múltiple. Ciertos tipos de fallos tienen más probabilidades de ocurrir que otros, debido al diseño del motor y su aplicación. Un cortocircuito en un motor conectado en estrella puede ser:

- a) Cerca de la línea de conexión.
- b) Cerca de la mitad de alimentación.
- c) Cerca del final en el punto neutro del devanado.

Los ajustes de disparo de los relés de protección para la protección del motor deben ser cuidadosamente seleccionados para garantizar la seguridad durante el funcionamiento normal. Probablemente, el más importante de estas condiciones es el arranque del motor. Típica magnitud de la corriente de arranque es de aproximadamente seis veces la corriente normal de plena carga. Sin embargo, puede ser más baja o mucho más alto para un diseño de motor en particular. Esta corriente de arranque inicial contiene una componente de corriente continua a la que algunos de los dispositivos de protección son sensibles.

2.4.7.3 Protección por sobrecorriente de fase.

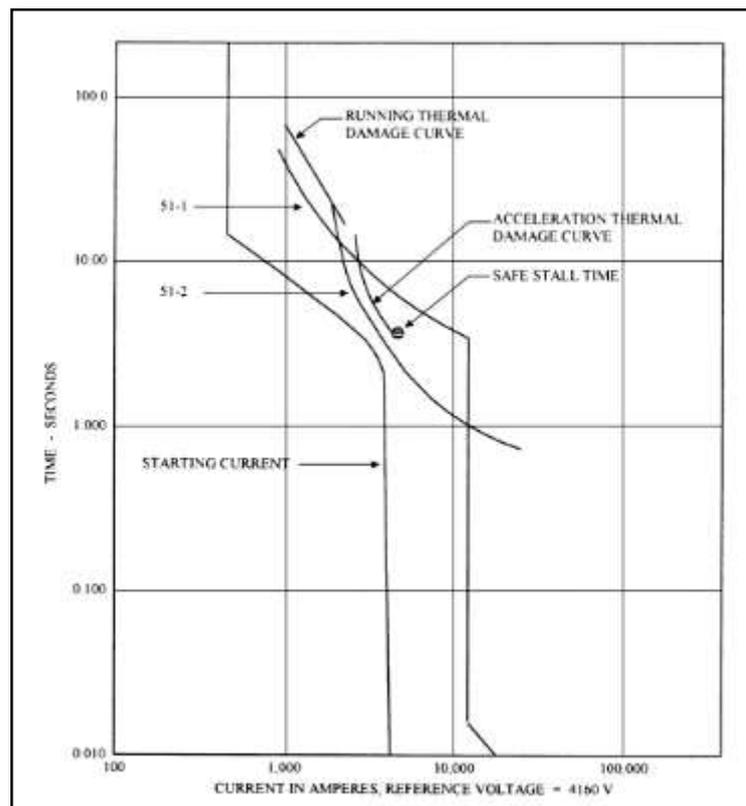
Circuitos de motor que cumplan con el NEC están obligados a tener una unidad de sobrecorriente (dispositivo de disparo serie, relé de protección, o fusible) en cada conductor de fase, u otros medios aprobados. Cuando se utilicen fusibles, se deben considerar las consecuencias de la operación desequilibrada y que exista retroalimentación de los fallos después de un fusible quemado. Relés de sobrecorriente instantánea IOC (50) se utilizan para detectar fallas en los cables de alimentación del motor, así como también fallas severas en el estator. Estos pueden

ser conectados para disparar directamente o a través de un retardo de tiempo corto para coordinar con la corriente asimétrica de arranque cuando se ajusta por encima de la corriente de rotor bloqueado.

Cuando se requiere un ajuste más sensible de lo permitido por un IOC, se aplica un relé de TOC (51). Relés TOC están disponibles con características de tiempo-corriente adecuado para la coordinación con características de arranque del motor y límites térmicos.¹⁵

Para los tipos de motores, donde las corrientes de arranque son bastante bajo, el uso de relés de TOC con curvas extremadamente inversa o inversa da protección para cortocircuitos en los rangos inmediatamente por encima de la corriente de arranque.

Ilustración 21 Protección de daño térmico utilizando dos relés de sobrecorriente.



Fuente: IEE Std C37.96-2000

¹⁵ Entiéndase por IOC a sobrecorriente instantánea y a TOC como sobrecorriente con tiempo definido.

2.4.7.4 Protección de secuencia negativa.

Corriente de secuencia negativa es aportado por el motor o el sistema cuando:

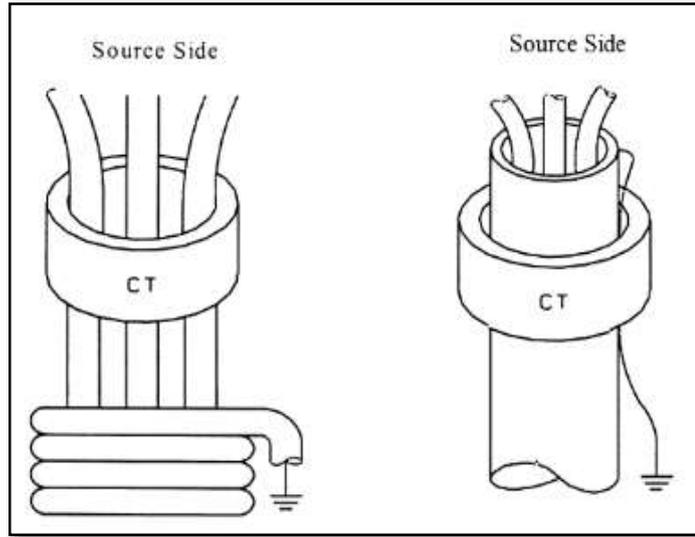
- a) Existe una condición de tensión desequilibrada (por ejemplo, fallas de fase abierta, fallas monofásicas o carga desequilibrada).
- b) Corte en la bobina del estator que se produce durante una reparación.
- c) Espiras en cortocircuito en el devanado del estator.

Estas corrientes de secuencia negativa inducen corrientes de doble frecuencia de línea que fluyen en el devanado amortiguador o partes del rotor. La magnitud de la corriente doble frecuencia de línea depende de la ubicación de la falla, el número de espiras en cortocircuito, la inducción mutua, el sistema, y la impedancia del motor. El peligro para las partes del rotor es una función del desequilibrio en la corriente del estator.

2.4.7.5 Protección de falla a tierra.

En los sistemas sólidamente aterrizados, relés de sobrecorriente de fase, dispositivos de disparo de acción directa, y fusibles permiten un cierto grado de protección de falla a tierra. Para los motores que se requiere una mayor sensibilidad a las fallas a tierra, se deben utilizar los relés de tierra. Relés de tierra pueden estar conectados residualmente o a un sensor de tierra mediante el uso de un CT toroidal que rodea todos los conductores trifásicos.

Ilustración 22 Transformador de corriente toroidal.



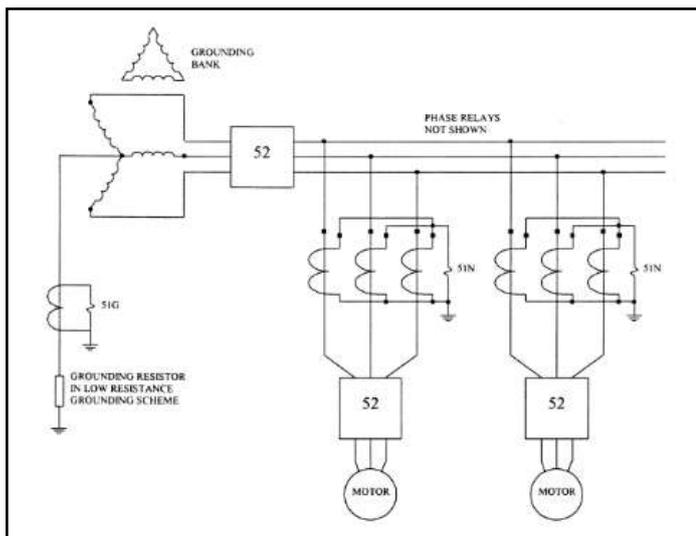
Fuente: IEE Std C37.96-2000.

2.4.7.6 Protección de tierra del sistema.

Cuando un grupo de motores se suministra desde un transformador que tiene una conexión de neutro a tierra, corrientes de falla a tierra pueden ser detectados en la conexión tierra a neutro del transformador.

Un CT con un relé TOC (51N) es insertado en el neutro para sistemas directo y resistencia a tierra. Este relé debe coordinar con los relés de tierra en cada alimentador para evitar la desconexión completa del bus por una falla en un alimentador.

Ilustración 23 Protección a tierra del bus por relé y CT.



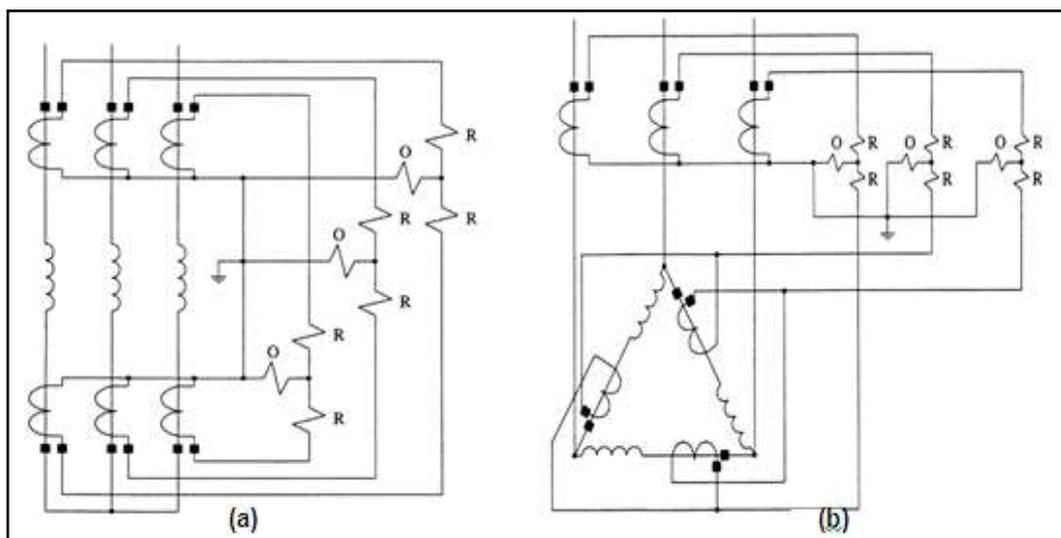
Fuente: IEE Std C37.96-2000

2.4.7.7 Protección Diferencial.

Relé de protección diferencial es un esquema en el que la corriente que entra en un arrollamiento se compara con los que salen de la bobina. Estos relés detectan corrientes de falla de baja magnitud durante la carga normal, y no disparan falsamente durante fallas externas de alta magnitud o durante periodos de arranque. Relés diferenciales no pueden detectar a su vez fallas en los mismos bobinados.

La ilustración 18 muestra las conexiones para la protección diferencial de un motor conectado en estrella y delta. El relé responde a la diferencia porcentual entre los valores de corriente de entrada y de salida. Los transformadores de corriente deben tener igual características y no debe ser utilizado para ningún otro propósito.

Ilustración 24 Protección diferencial de motores conectados en estrella o en delta.



Fuente: IEE Std C37.96-2000.

2.4.8 Condiciones anormales de alimentación.

2.4.8.1 Discusión general.

Los motores están diseñados para funcionar con éxito cuando se someten a pequeñas variaciones en la tensión de alimentación y la frecuencia, según normas de motores de inducción y síncrono por ANSI y NEMA (MG1-1998). Sin embargo, cualquier variación en el voltaje o la frecuencia resultará en un cambio en el rendimiento del motor (es decir, el par, la velocidad, la temperatura, la eficiencia, y el factor de potencia de funcionamiento).

2.4.8.2 Efectos sobre el rendimiento del motor debido a las variaciones en la alimentación del motor.

En general, los siguientes cambios en el rendimiento del motor se producirán debido a variaciones en la fuente de alimentación del motor:

- a) Par puede variar con el cuadrado de la tensión aplicada.
- b) Velocidad variará directamente con la frecuencia y aumentar ligeramente con un aumento de tensión.
- c) Aumento de la temperatura de funcionamiento varía con el cuadrado de la corriente del motor.

- d) La eficiencia está directamente relacionada con pérdidas del motor; cualquier aumento en la corriente del motor se traducirá en una disminución de la eficiencia.
- e) Factor de potencia está directamente relacionada con la corriente de magnetización del motor (sin carga); un aumento en la corriente de la magnetización resulta en una disminución del factor de potencia del motor.
- f) La mayoría de los motores pueden ser considerados dispositivos kVA constante, es decir, a medida que disminuye el voltaje, la corriente aumenta proporcionalmente.

Aunque cada una de estas características de rendimiento puede afectar el proceso del que el motor es una parte de aquello, sólo la temperatura de funcionamiento es de principal preocupación con respecto a la protección del motor. Las temperaturas de funcionamiento determinarán la vida del aislamiento del motor. Cada aparición de aumento de la temperatura reducirá eficazmente la vida del motor. Es, por lo tanto, deseable detectar estas condiciones tan pronto como sea posible para limitar la pérdida de la vida del motor.

2.4.8.3 Categorías que afectan directamente a la temperatura de funcionamiento del motor.

Hay siete categorías que afectan directamente a las temperaturas de funcionamiento del motor:

- a) Corriente de arranque (rotor bloqueado).
- b) Corriente de magnetización (sin carga).
- c) Corriente de carga.
- d) Corrientes parásitas.
- e) Corrientes de pérdida.
- f) Las corrientes de secuencia negativa (desequilibrio de corriente) que circula en las barras del rotor, cuñas del rotor, o devanados amortiguadores.
- g) Cargas no lineales.

La magnitud de cada una de estas corrientes puede verse afectada por tensiones anormales y / o la frecuencia anormal.

2.4.8.4 Tensión anormal.

Tensiones que se desvían de tensiones nominales más que la tolerancia dada en NEMA MG-1-1993 podrá estar sometido el motor a peligros para los cuales se han requerido formas especiales de protección de funcionamiento. En el presente contexto, un voltaje anormal abarca lo siguiente:

- a) Baja tensión.
- b) Sobretensiones.
- c) Desbalance de tensión y falla de fase.

2.4.8.5 Protección de baja tensión.

Condiciones de baja tensión pueden durar sólo unos pocos ciclos o continuar en una base de estado estacionario. El efecto de la condición de bajo voltaje en cualquier motor variará dependiendo del tipo de motor, la carga accionada, y si el motor está en marcha o ha de ser iniciado.

En muchos casos, los motores se pueden aproximar como constantes dispositivos kilovoltampere para una carga dada del eje, por lo tanto, las variaciones de corriente continúan con variaciones de tensión inversa. Un bajo voltaje trifásico balanceado es acompañado por una sobrecorriente trifásica balanceada. La protección de sobrecorriente puede ofrecer una protección de motor para excesivas caídas de tensión de estado estable. Siendo ese el caso, cuando se produce una condición de baja tensión a largo plazo, los dispositivos de sobrecorriente operan para proteger el motor. Sin embargo, algunas condiciones de mínima tensión no pueden ser protegidas adecuadamente y pueden requerir protección especial.

Al determinar los requisitos para la protección de baja tensión para los motores grandes, protección de bajo voltaje de larga duración y protección de baja tensión de corta duración (0-15 ciclos) debe ser considerado.

2.4.8.6 Baja tensión de larga duración.

Los motores grandes se especifican típicamente para arrancar con éxito, sin daños, con tensiones en los terminales tan bajo como 70 % a 85 % de la tensión nominal. Demasiado baja tensión en los terminales de un motor, cuando el motor está arrancando puede evitar que llegue a su velocidad nominal, o hacer que el periodo de aceleración se extienda, lo que resulta en un calentamiento excesivo de los devanados del rotor y el estator. En el caso de un motor síncrono, el motor no puede alcanzar la velocidad suficiente para que pueda alcanzar en sincronismo cuando se aplica el campo.

2.4.8.7 Baja tensión de corta duración (huecos de tensión).

A menudo, los huecos de tensión duran sólo 5-15 ciclos (base de 60 Hz) y, en la mayoría de los casos, no presenta daño a los motores de inducción, si se les permite permanecer en la línea. Si los motores se desconectan automáticamente durante estas caídas, interrupciones costosas pueden ser experimentados. En la aplicación de la protección para tales instalaciones, el relé no debe ser muy rápido o muy sensible que lo necesario.

En el caso de grandes motores síncronos que suministra cargas de proceso críticas, por lo general es deseable ejecutar estudios estabilidad, teniendo en cuenta la inercia total del motor y la carga accionada, la duración del hueco de tensión, y las características del motor. Este estudio es de gran ayuda en la selección del equipo de protección que permita mantener el motor en la línea, y para determinar las condiciones limitantes de huecos de tensión.

2.4.8.8 Protección contra sobretensiones.

El funcionamiento de motores síncronos y de inducción con sobretensión en estado estable estacionario dentro de la tolerancia de las normas del motor no se considera perjudicial. La sobretensión provoca un aumento en la corriente de magnetización (sin carga) debido a un aumento en las pérdidas de hierro en la máquina. En una

carga dada en el eje, la sobretensión también causa una disminución en la corriente de carga. Puesto que la corriente de magnetización es un pequeño porcentaje (típicamente 20 % a 30 %) de la corriente total en motores grandes, la corriente total resultante será menor que la corriente a la tensión nominal del motor. Por lo tanto, el aumento de las temperaturas del devanado del estator a altas tensiones de trabajo es poco probable.

Este no es el caso para los motores más pequeños, porque la corriente de magnetización es un porcentaje mucho mayor de la corriente total del motor. Sin embargo, si la carga del motor actual se mantuviera constante, y la corriente de magnetización del motor se incrementó debido a la sobretensión, a continuación, las temperaturas de funcionamiento del motor se incrementan.

Un motor es esencialmente un dispositivo de impedancia constante durante el periodo de arranque inicial. Por lo tanto, cuando arranca con sobretensión, la corriente del rotor bloqueado es más alta que la corriente nominal de arranque en algo mayor que la proporción directa al aumento de la tensión. El relé de rotor bloqueado protege al motor contra daño térmico cuando la tensión no es más de 10 % por encima de la tensión nominal en el momento de arranque.

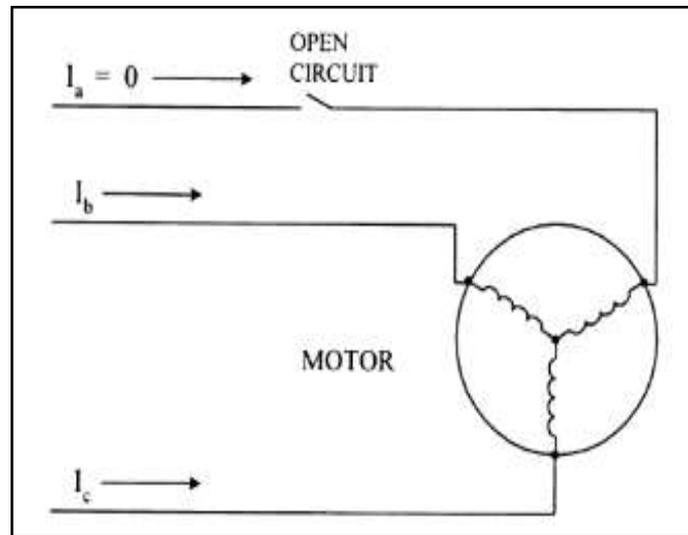
Las sobretensiones transitorias también pueden ser extremadamente peligrosas para los motores. Protección del motor para tales condiciones sólo se puede lograr mediante el uso de capacitores de sobretensión y / o pararrayos.

2.4.8.9 Protección de desbalance y fallo de fase.

Cuando un motor síncrono está funcionando a carga nominal, y luego pierde una fase de alimentación, el motor será llevado a fuera de paso y debe ser retirado del servicio. Sin embargo, si el motor está ligeramente cargado y sigue funcionando sincrónicamente, habrá pérdidas adicionales como resultado de la asimetría en la corriente de línea, y puede resultar en la destrucción del devanado amortiguador. Cuando un motor de inducción pierde una fase, aumenta su deslizamiento, sin embargo, por lo general no se atasca a no ser que la tensión de alimentación monofásica resultante es inferior a la normal, o el eje de carga es más de 80% de la plena carga. Las pérdidas aumentan significativamente cuando se carga cerca o por

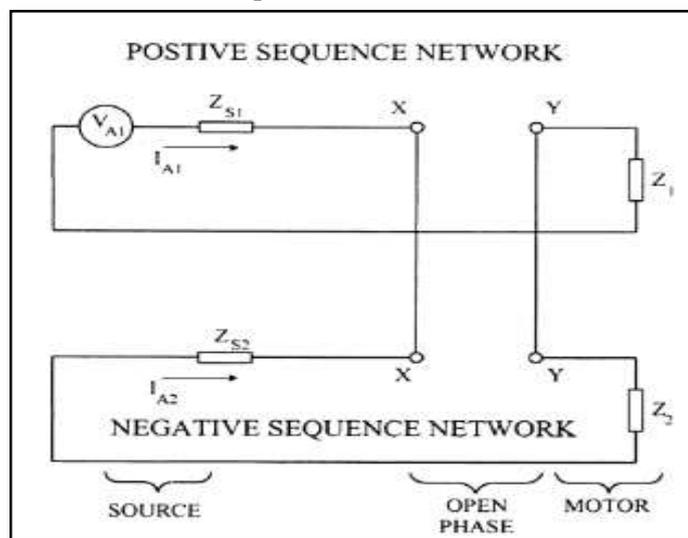
encima de su nominal. Con cualquier tipo de motor, una sola fase es una condición peligrosa, y se deben tomar medidas (de preferencia por la acción del relé) para desactivar el motor.

Ilustración 25 Corriente en el devanado del motor con una fase en circuito abierto.



Fuente: IEE Std C37.96-2000.

Ilustración 26 Secuencia para una condición de fase una fase abierta.

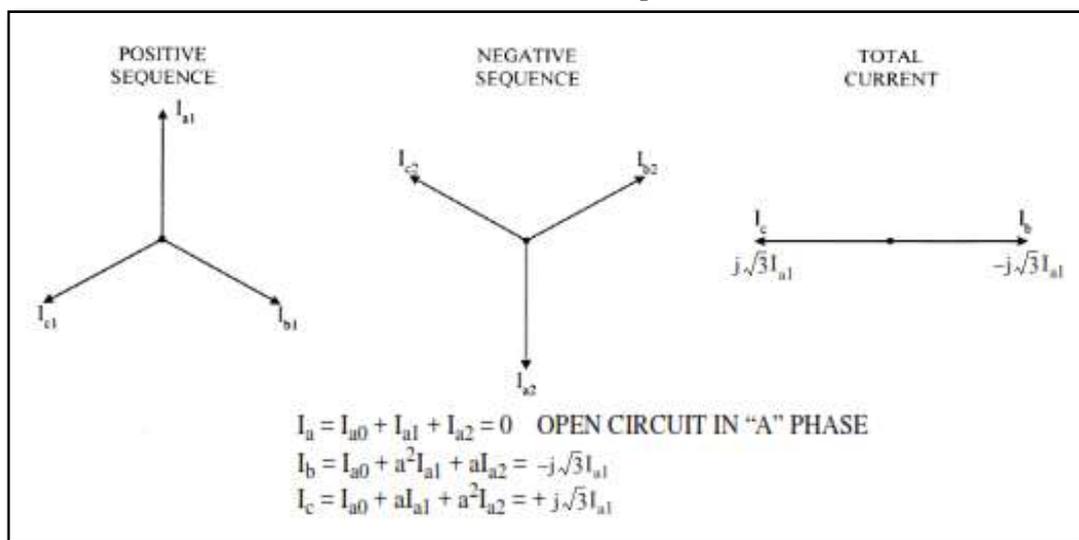


Fuente: IEE Std C37.96-2000

Un pequeño desequilibrio en la tensión produce un gran flujo de corriente de secuencia negativa, ya sea en un motor síncrono o de inducción. La impedancia de secuencia negativa por unidad (pu) es aproximadamente igual al recíproco de la tensión nominal de corriente de rotor bloqueado. Como por ejemplo, un motor tiene

una corriente de rotor bloqueado de seis veces la corriente nominal, tiene una impedancia de secuencia negativa aproximadamente 0.160 pu. Cuando se aplican voltajes que tienen componente de secuencia negativa de 0,05 pu, corrientes de secuencia negativa de 0,30 pu fluyen en los devanados. Por lo tanto, una tensión de 5% de desequilibrio produce una corriente de secuencia negativa del 30% de la corriente a plena carga. La gravedad de esta condición es mencionada por el hecho de que con esta corriente adicional, el motor puede experimentar un aumento de la temperatura del 40% al 50%.

Ilustración 27 Corriente de secuencia para una fase abierta.



Fuente: IEE Std C37.96-2000

Corrientes de fase de secuencia negativa producen un flujo que gira en una dirección opuesta a la rotación del rotor. Este flujo corta las barras del rotor a una velocidad muy alta y genera una tensión, lo que resulta en una gran corriente del rotor. Además, la naturaleza 120 Hz de la corriente inducida produce un efecto piel marcada en las barras del rotor, lo que aumenta en gran medida la resistencia del rotor. El calentamiento del rotor es sustancial para el menor desequilibrio de tensión. El exceso de calor puede ocurrir con la corriente de fase actual menor que la corriente nominal del motor.

Cuando un motor sincrónico o de inducción trifásicos se energiza y una fase de alimentación está abierta, el motor no arrancará. En estas condiciones, se

sobrecalienta rápidamente y se destruye a menos que se tomen medidas correctivas para desenergizar el motor. El calentamiento bajo estas circunstancias es similar a la de un fallo trifásico en el arranque, excepto que la corriente de línea es ligeramente inferior (aproximadamente 0,9 veces, la corriente trifásica de rotor bloqueado).

Protección de desequilibrio debe detectar las condiciones dañinas sin responder a las condiciones para las cuales el equipo de protección no está diseñado para operar. Varias clases de relés se utilizan para proporcionar protección de desequilibrio.

2.4.9 Condiciones de funcionamiento anormales.

2.4.9.1 Protección incompleta de secuencia de arranque.

Un relé de secuencia incompleta (48) es un relé que devuelve el equipo a la posición normal o apagada y lo bloquea si la secuencia de arranque, operación, o detención normal no se ha completado correctamente dentro de un tiempo predeterminado. Protección de arranque de secuencia incompleta puede ser proporcionada por un relé de tiempo definido ajustable en función del arranque eléctrico por voltaje reducido.

2.4.10 Especificaciones de protección del motor.

2.4.10.1 Consideraciones generales.

Un completo esquema de protección debe ser elegido para lograr una óptima fiabilidad de servicio, seguridad y protección de los equipos a un costo razonable. Es esencial que las características de funcionamiento del elegido sistema de protección del motor deben ser coordinadas con las de la instalación y, si es necesario, el proceso o la carga involucrada, si la operación selectiva de los dispositivos de protección y control es realizado.

En las instalaciones de motores de gran tamaño, puede ser necesario consultar al fabricante del motor para establecer claramente tales requerimientos como el factor de servicio, ciclo de trabajo, frecuencia de arranques, par de arranque, corriente, tiempo de aceleración, refrigeración, fuente de lubricación de rodamientos, esfuerzos

mecánicos y los límites de vibración, las tasas de calentamiento del rotor y el estator, límites térmicos, y los efectos de los protectores de sobretensión y de la corrección del factor de potencia de capacitores, si son utilizados. Si la aplicación utiliza variadores de velocidad, debe proporcionar la coordinación entre el motor y la protección del sistema de accionamiento.

Selección de los esquemas de protección debe basarse en los siguientes factores:

- a) Tipo y potencia nominal del motor.
- b) Características de la alimentación, tales como tensión, fases, el método de puesta a tierra, y nivel de cortocircuito.
- c) Tipo de controlador de motor empleado.
- d) Características de operación y la configuración de los dispositivos de protección entre el arrancador de motor y fuente de alimentación.
- e) Los dispositivos de protección que supervisan la maquinaria accionada o el proceso de carga, tales como la vibración, torsión y otros límites mecánicos.
- f) La función y la naturaleza del proceso que determina la importancia de la unidad.
- g) Medio Ambiente del motor, dispositivo de conmutación asociados, y los dispositivos de protección.
- h) Costo de esquema de protección con respecto a la de los equipos asociados.
- i) Tiempo permitido de rotor bloqueado en frío y en caliente. Y el tiempo de aceleración.
- j) Curva de corriente vs tiempo durante el arranque.
- k) Frecuencia de partida.

2.4.11 Tablas de protección del motor.

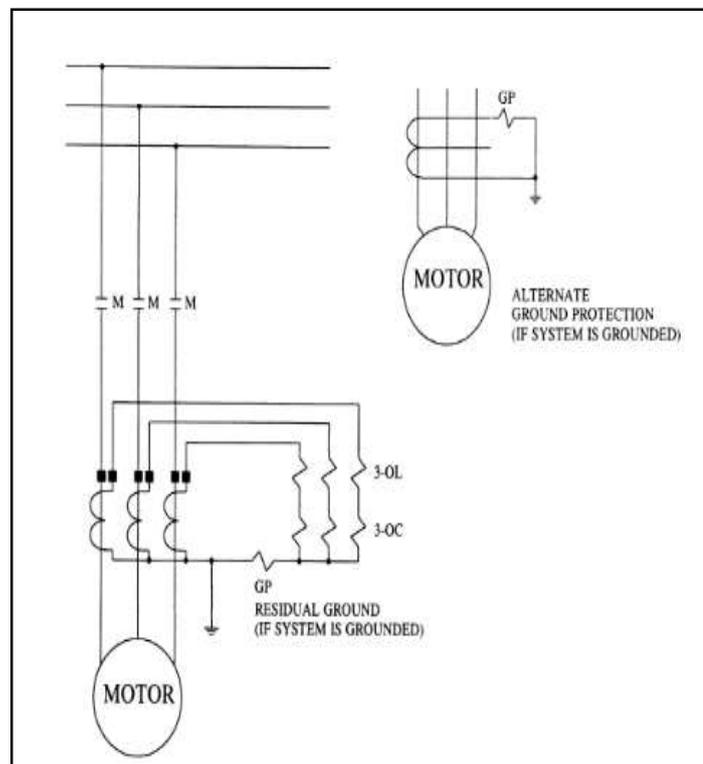
El propósito de este apartado es resumir los dispositivos disponibles para la protección de motores síncronos y de inducción que trabajan en aplicaciones generales. El equipo de arranque del motor y los dispositivos de protección correspondiente ilustrados a continuación no han de considerarse como una especificación del diseño o un estándar, sino más bien como una guía para la

selección de una protección adecuada para cualquier aplicación del motor síncrono o de inducción.

Dispositivos de protección alternativos son tabulados, el uso de los cuales puede ser justificable o preferible dependiendo de la aplicación particular considerada y la filosofía de operación.

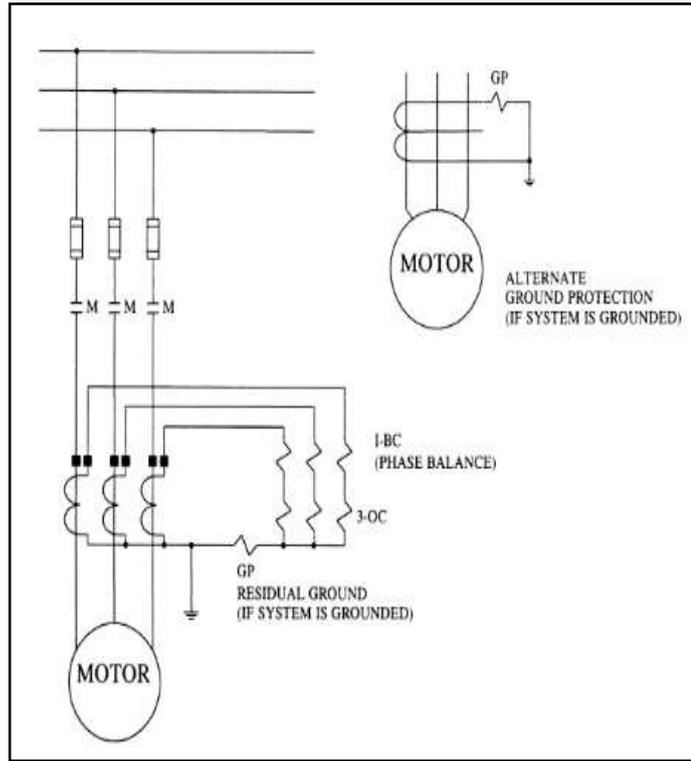
La designación NEMA utiliza la terminología de la norma ANSI / NEMA ICS 2-1988, así como las denominaciones de dispositivos de ANSI / NEMA ICS 1-1.990 consulte IEEE Std C37.2 - 1991.

Ilustración 28 Controlador de motor mediano clase E1 (ver tabla 1).



Fuente: IEE Std C37.96-2000

Ilustración 29 Controlador de motor de media tensión clase E2.



Fuente: IEE Std C37.96-2000

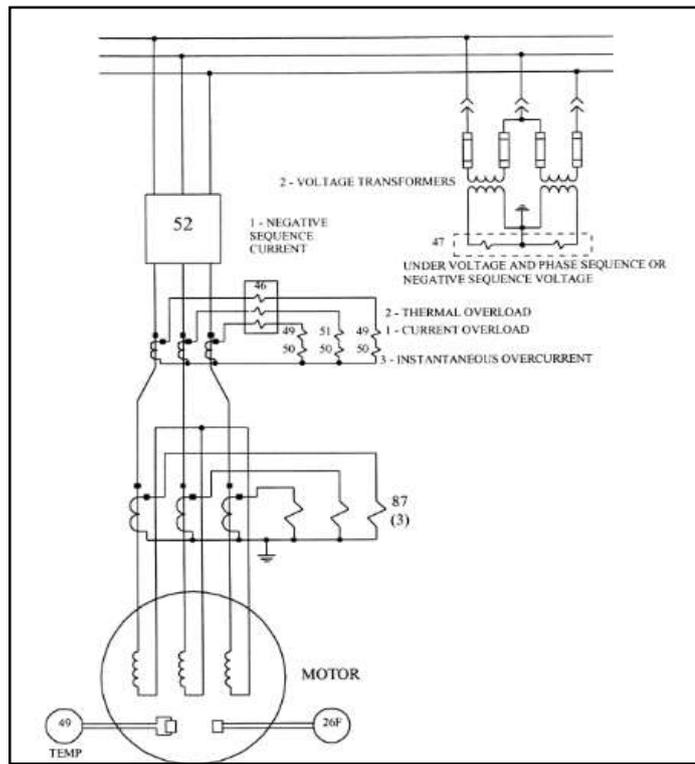
Tabla 1 Controlador de motor de media tensión clase E. ANSI/NEMA ICS 2-1988, 324.

Ratings	Class E1 (without fuses)	Class E2 (with fuses)
Nominal system voltaje	2300–6900	2300–6900
Horsepower	0–8000	0–8000
Symmetrical MVA interrupting capacity at nominal system voltage	25–75	160–570
Types of protective devices	Quantity	NEMA designation
Overload, or locked rotor, or both:		
Thermal overload relay	3	OL OC
TOC relay	3	TR/OC
IOC relay plus time delay	3	
Short circuit:		
Fuses, Class E2	3	FU
IOC relay, Class E1	3	OC
Ground fault:		
TOC residual relay	1	GP
Overcurrent relay with toroidal CT	1	GP

Phase balance		
Current balance relay (per motor), or Negative-sequence voltage relay (per bus), or both	1 1	BC —
Undervoltage: Inherent with integral control supply and three-wire control circuit, when voltage falls sufficiently to permit the contractor to open and break the seal-in circuit	—	UV
Temperature: Temperature relay, operating from resistance sensor or thermocouple in stator winding	—	OL

Fuente: IEE Std C37.96-2000

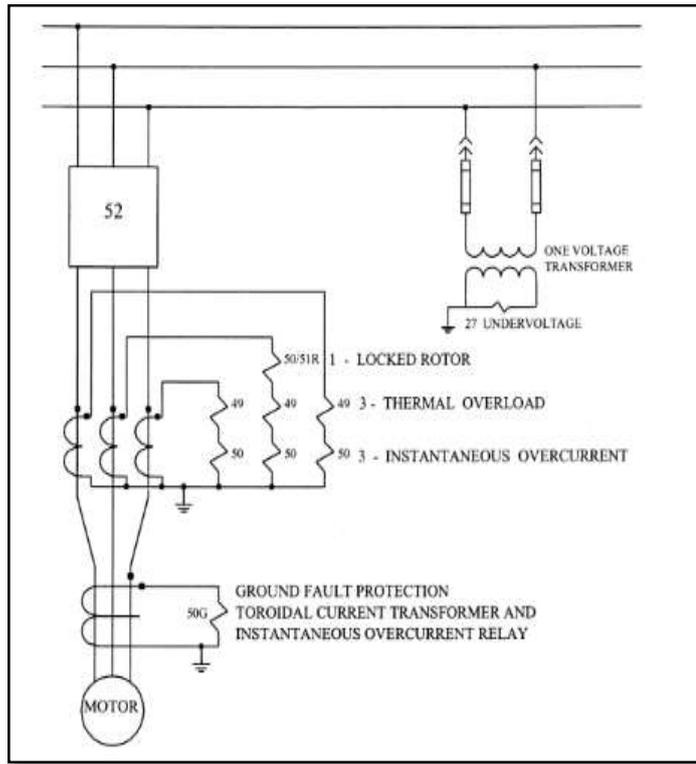
Ilustración 30 Arrancador de motores con interruptor, protección de grandes motores.¹⁶



Fuente: IEE Std C37.96-2000

¹⁶ Se puede visualizar en el anexo A la ilustración para su mayor entendimiento.

**Ilustración 31 Arrancador de motores con interruptor, protección de grandes motores.
Ver tabla 2.**



Fuente: IEE Std C37.96-2000

Tabla 2 Protección de motores de media tensión

Ratings	Range of ratings	
Continuos amperes	0–3000	
Nominal system voltaje	4160–3800	
Symmetrical amperes interrupting capacity at maximum rated voltage	3500–41 000	
Type of relay for stator protection	Quantity	Standard device function number
Overload:		
Thermal overcurrent relay	2 or 3	49
TOC relay	2 or 3	51
Temperature relay, operated from resistance sensor or thermocouple in stator winding	1	49
Locked rotor:		
Damper winding thermal relay TOC relay with instantaneous attachment	1	26
	1	50/51R

Short circuit:		
TOC relay with instantaneous attachment	2 or 3	50/51
IOC relay	3	50
Percentage differential relay Self-balancing primary current, differential relay	3	87
	3	87
Ground fault:		
TOC residual relay	1	51N
Instantaneous or TOC relay with toroidal CT	1	50G or 51G
Phase balance:		
Current phase-balance relay	1	46
Negative-sequence voltage relay	1	47
Undervoltage:		
Instantaneous undervoltage relay Time	1	27
undervoltage relay Undervoltage and phase	1	27
sequence Undervoltage supervised by phase	1	27/47
sequence relay	1	27/47
Underfrequency relay (where required)	1	81
	1	81

Fuente: IEE Std C37.96-2000

Tabla 3 Protección para el campo de un motor síncrono.

Function	Standard device function number	NEMA designation
Synchronous speed device	13	—
Field contractor or circuit breaker	41	FC
Field-discharge resistor	—	—
Field application relay	56	—
Power factor relay (out-of-step)	55	PF
Field factor relay	40	FL
Excitation check relay	53	—
Incomplete sequence relay	48	—

Fuente: IEE Std C37.96-2000

2.4.12 Configuración y ajuste de los dispositivos de protección.

2.4.12.1 Discusión general.

El propósito del ajuste de un relé de protección es proporcionar una protección óptima al equipo que está siendo protegido. El ajuste de una función de protección del relé determina la magnitud de la cantidad significativa en el que opera. Hay muchos tipos de relés de protección disponibles. Los métodos de selección de los ajustes de relés de protección se detallan en esta cláusula para las funciones de los relés de protección contemplados en la Tabla1 a la Tabla2. Esto incluye los ajustes de la función de protección adecuada para las aplicaciones multifunción, como sistemas de protección basados en microprocesadores

2.4.12.2 Ajustes del dispositivo de protección.

Los números de dispositivo y definiciones en esta sección se han tomado de IEEE Std C37.2-1991.

2.4.12.3 Dispositivo de velocidad síncrona (13).

Los dispositivos tales como un interruptor centrífugo de velocidad, un relé de deslizamiento-frecuencia, un relé de tensión, y un relé de baja corriente, o cualquier dispositivo que funciona aproximadamente a la velocidad de sincronismo de una máquina, entran en esta categoría.

Ellos son ajustados después de las condiciones de arranque del motor, o cuando la corriente del motor se ha estabilizado. Los relés de corriente se ajustan en condiciones equivalentes a 95% de la velocidad nominal. Relés de sincronismo se fijan en 1% a 5% de deslizamiento, dependiendo de la aplicación del motor.

2.4.12.4 Dispositivo térmico de campo (26F).

Este dispositivo detecta una sobrecarga térmica en el campo, por lo general mediante la medición de la corriente en el campo, ya sea directamente o por medio de la tensión a través de una derivación. Es normalmente conectado como una alarma. La

constante de tiempo térmica del dispositivo debe ser seleccionado para ser tan cerca como sea posible de la constante de tiempo térmica del equipo protegido.

2.4.12.5 Dispositivo relé de mínima tensión (27).

Este dispositivo es un relé que se activa cuando su voltaje de entrada cae por debajo de un valor predeterminado. Se proporciona un retardo de tiempo ajustable, de manera que los huecos de tensión momentáneos eviten la interrupción de la fuente de alimentación.

Los relés instantáneos con temporizadores ajustados por muy poco tiempo a menudo son útiles para que los motores se mantengan en funcionamiento durante las caídas de tensión, sin degradar la protección del motor. El ajuste del relé de mínima tensión se establece normalmente en aproximadamente el 80 % de la tensión normal. Para los casos en los que la caída de tensión es muy significativa durante el arranque, puede ser necesario ajustar el disparo del relé a un valor más bajo para prevenir la operación del relé durante el periodo de arranque, o para activar el relé con un tiempo después de finalizar el arranque del motor.

El ajuste del temporizador, cuando se utiliza con un dispositivo de baja tensión de tipo instantáneo, es normalmente 2-3 s. Para los casos en que el tiempo de despeje de fallos en los circuitos de la fuente es excepcionalmente largo, puede ser necesario aumentar este ajuste. En el caso de disparo de alta velocidad, el temporizador auxiliar de mínima tensión puede ajustarse hasta un mínimo de 0,1 s. Para los relés de tipo de inducción, donde el tiempo de retardo es proporcional al grado de mínima tensión, un retardo de tiempo de 1,25 a 2,0 s para una reducción de tensión de normal a cero es generalmente satisfactorio. El relé automáticamente da un tiempo más largo para un cambio en el voltaje de normal a algún valor de la tensión intermedia.

2.4.12.6 Dispositivo 48-Incompleta relé de Secuencia.

El dispositivo 48 es un relé que devuelve el equipo a la posición normal o apagado, bloqueando cuando la secuencia de arranque del equipo no es finalizada dentro de un tiempo programado en el relé.

Cuando el dispositivo es utilizado sólo con fines de alarma, preferiblemente debe ser designado como dispositivo 48A (alarma). El tiempo de este dispositivo se debe ser ajustado por el tiempo de arranque normal del motor, más un margen de tiempo de seguridad, para asegurar contra disparos innecesarios causados por variables eléctricas y mecánicas.

2.4.12.7 Dispositivo 49-máquina o relé térmico transformador.

El dispositivo 49 es un relé que funciona cuando la temperatura del devanado de armadura de una máquina, o devanado de un transformador, excede un valor predeterminado (límite térmico).

Al ajustar los relés térmicos, es permitido al motor llevar sobrecargas de cierta cantidad y duración que no permita peligro o daño del aislamiento. Por esta razón, un ajuste nominal de 115% a 125% de la corriente del motor a plena carga debe multiplicarse por el factor de corrección que figura en la tabla a continuación, este sirve para coordinar la protección del motor por debajo de la curva de daño térmico del estator o armadura.

Las recomendaciones de los fabricantes para la selección de un régimen continuo o de corta duración pueden diferir en esta tabla y se debe dar la debida consideración.

Tabla 4 factor de corrección dependiendo del factor de servicio del motor.

Time rating of motor	Correction factor
Continuous, 1.15 service factor	1.0
Continuous, 1.0 service factor	0.9
Short time, 60 min	0.8
Short time, 30 min	0.75
Short time, 15 min	0.7
Short time, 5 min	0.6

Fuente: IEE Std C37.96-2000

Dispositivos de estado sólido y digitales están disponibles y se pueden utilizar en lugar de relés de sobrecarga térmica. Estos dispositivos ofrecen la protección de

sobrecarga tradicional para motores y, además, incluye características protectoras de varios arranques, desbalance, baja carga, y la inversión de fase. A menudo, hay un ajuste para seleccionar la corriente de carga del motor, una opción de protección (Clase 10, 20, o 30), y un ajuste en por ciento de desequilibrio de corriente. Estos dispositivos normalmente ofrecen la opción de rearme manual o remoto.

2.4.12.8 Dispositivo 50/51 de sobrecorriente.

- a) Dispositivo 50-IOC sobrecorriente instantánea. Un relé que funciona de manera instantánea en un valor excesivo de corriente o en una excesiva tasa de aumento de la corriente. Esta función indica un fallo en el aparato o circuito que está siendo protegido.
- b) Dispositivo 51- sobrecorriente de tiempo definido. Un relé que funciona cuando la corriente de entrada de corriente alterna supera un valor predeterminado y en el que la corriente de entrada y el tiempo de operación están inversamente relacionados a través de una porción sustancial del rango de funcionamiento.

2.4.12.9 Fusibles.

Los fusibles para la protección de sobrecorriente del circuito del motor deben tener habilidades de interrupción adecuados , así como corriente nominal y características de rendimiento que permitan que el motor arranque, y seguir proporcionando, para todos los valores de sobrecorriente , la mayor protección posible para el motor, conductores del circuito, y el controlador del motor.

Los fusibles sin retardo con corrientes nominales de 250 % a 300 % del valor de corriente a plena carga del motor suelen ser necesarios para que el motor arranque y permitir normal protección del dispositivo en sobrecargas de operación. El intervalo de la relación de fusión puede ser reducido de 250 % a 300 % a 200 % a 250 % de la corriente del motor a plena carga, proporcionando así una mejor protección de corriente de defecto cuando se utiliza el arranque por tensión reducida.

Para valores de fusible de 600A o menos, el fusible se puede aumentar en un 400% si es requerido por la corriente de arranque del motor. Las características de tiempo-corriente de los fusibles deben estar correlacionadas correctamente con las características de tiempo corriente de los relés de sobrecarga, de modo que los relés de sobrecarga funcionen antes que el fusible en el rango de operación de sobrecargas del motor. Además, el fusible debe operar antes que el relé de sobrecarga y el contactor se abran para valores de corriente de defecto superior a la capacidad de interrupción del contactor.

Los fusibles con tiempo de retardo (elemento dual) con corrientes nominales de 165% a 180% del motor a plena carga suelen ser necesarios para que el motor arranque y permitir el funcionamiento normal del dispositivo de protección a operar en sobre-cargas. La relación máxima de fusión no debe exceder de 225% de la corriente del motor a plena carga. Las características de tiempo-corriente de estos fusibles también deben coordinarse adecuadamente con las características de tiempo-corriente de los relés de sobrecarga para obtener el mismo tipo de actuación. Los rangos de corriente del fusible con retardo o sin retardo deben ser aproximadamente igual al valor corriente a plena carga del motor cuando se utiliza como único dispositivo de sobrecorriente para la protección contra sobrecargas de operación y altas corrientes de falla. Fusibles con retardo pueden ser considerados más aceptable para esta función en una amplia gama de temperaturas ambiente debido a su sensibilidad de temperatura ambiente y el incremento de los tiempos de respuesta de sobrecargas de operación.

Para fusibles limitadores de corriente, su capacidad de limitación de corriente también debe ser considerado en la toma de una selección de circuitos que tienen una alta disposición de corriente de cortocircuito. Las capacidades de interrupción de todos los fusibles deben ser igual o mayor que la corriente de cortocircuito disponible en sus respectivas ubicaciones.

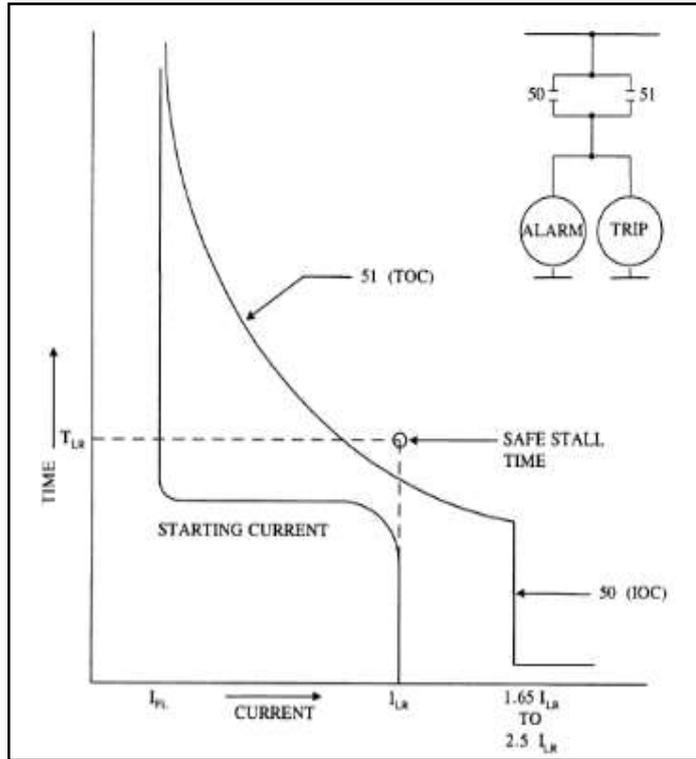
2.4.12.10 Dispositivo 50 Sobrecorriente instantánea.

Cuando la corriente de falla en los terminales de un motor es considerablemente mayor que la corriente de arranque o la contribución del motor a un fallo, una unidad

de ajuste de disparo instantáneo puede ajustarse de 165 % a 250 % de la corriente de rotor bloqueado para disparar directamente. El requisito general para el uso de esta unidad instantánea o relé instantáneo es que el ajuste sea tan bajo como sea posible, sin embargo, nunca funcionara durante el periodo de arranque. Debido a que este tipo de relé puede ser susceptible a la operación de una componente dc, el valor de corriente de entrada se multiplica por un factor para tener en cuenta el valor corriente asimétrica que se puede obtener. El grado de desplazamiento se determina por el ángulo de la onda sinusoidal en el momento de la energización del motor. La duración del desplazamiento se determina por la relación X / R . El valor del factor varía hasta un máximo de 1,73. Altas corrientes asimétricas se asocian generalmente con equipos de voltaje más alto (4,16 a 13,8 kV) y las fuentes de corriente de fallas más fuertes. Si el dispositivo de protección elimina eficazmente la componente dc de la señal de corriente, el IOC puede ajustarse con mayor sensibilidad. Si la corriente de inrush no se conoce con precisión, un 10 % al 25 % adicional se añade normalmente como un factor de seguridad cuando los ajustes son calculados.

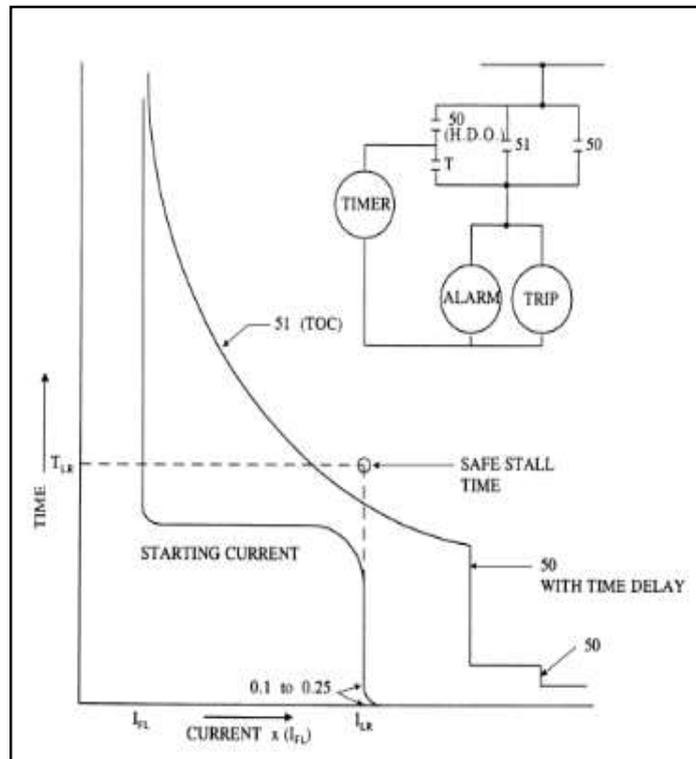
Cuando es necesario ajustar un disparo IOC en un valor de corriente bajo para proporcionar una protección de fallo adecuada, un disparo por sobrecorriente instantánea con tiempo definido se puede (de 6 a 15 ciclos) para evitar la operación en la corriente asimétrica de arranque. Cuando se aplica el retardo de tiempo, el usuario debe asegurarse de que todo el equipo pueda soportar el fallo de corriente máxima disponible por el tiempo de liberación total (tiempo de operación del relé + tiempo auxiliar de retardo + tiempo de funcionamiento del interruptor de circuito). Algunos relés estáticos han eliminado la necesidad para el tiempo de retardo auxiliar por tener una característica inversa incorporada en la función de IOC.

Ilustración 32 Ajuste típico de relé de sobrecorriente 50/51.



Fuente: IEE Std C37.96-2000.

Ilustración 33 Ajuste adicional protección 50 con tiempo definido.



Fuente: IEE Std C37.96-2000.

En motores con accionamientos de alta inercia, u otros motores con baja tensión para el arranque, el tiempo de arranque del motor puede ser igual o superior al tiempo de rotor bloqueado permitido. Es poco probable que un relé TOC se pueda configurar para proporcionar protección de arranque sin disparar durante el inicio normal.

2.4.12.11 Dispositivo 50G. Relé de sobrecorriente de tierra.

Este relé, que se activa por la corriente de un CT toroidal alrededor de los tres conductores que alimentan al motor, está destinado a proporcionar protección de sobrecorriente de tierra muy sensitiva para los motores. Dado que las corrientes de tres fases en el primario del CT suman cero, el relé es sensible sólo a la corriente de falla a tierra.

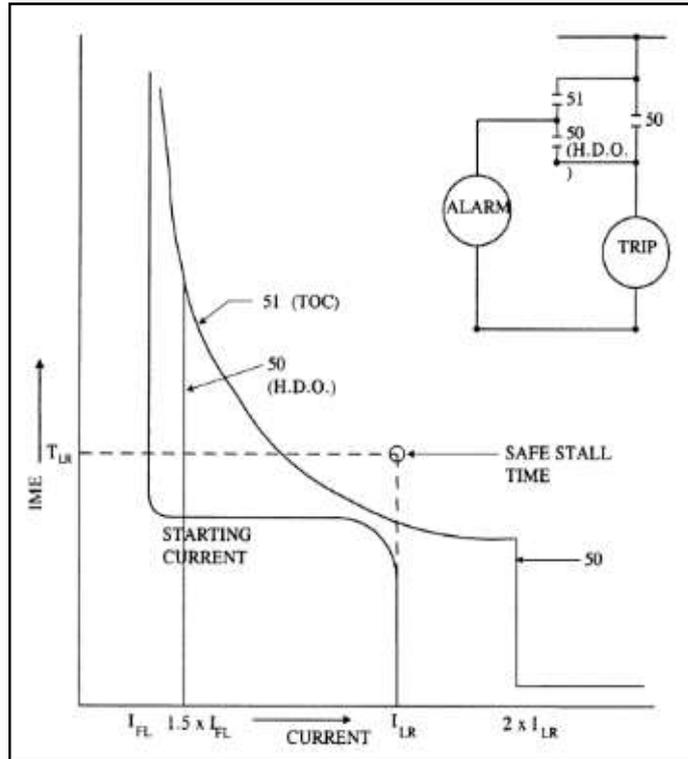
Mínimo ajuste de corriente primaria se produce cuando la impedancia del CT y la impedancia del relé se emparejan. La curva del CT y las instrucciones del relé proporcionan la información necesaria para aprovechar este óptimo juego.

2.4.13 Dispositivo 51-Relé de sobrecorriente de tiempo definido (TOC).

2.4.13.1 Relés de sobrecorriente de tipo de inducción.

Estos relés, frecuentemente son equipados con dos protecciones adicionales de tipo IOC (sobrecorriente instantánea), se aplican comúnmente para la protección de los motores. Para aplicaciones en las que se utiliza el relé TOC (sobrecorriente con tiempo definido) en conjunción con los relés térmicos, la corriente de protección mínima (pickup) se fija en 150% a 175% de la corriente de carga nominal.

Ilustración 34 Típico ajuste 50/51 cuando 50 supervisa a 51.



Fuente: IEE Std C37.96-2000.

Cuando se utiliza para la protección de rotor bloqueado, el ajuste de tiempo de retardo debe ser seleccionado para proporcionar un margen de 2-5 s por encima del tiempo de arranque a la tensión nominal. Debida consideración se debe dar el efecto integrador de la corriente de arranque del motor en el relé. Cuando el tiempo de arranque está en el rango de 5-10 s, un margen de 2 s es satisfactorio. Para un tiempo de arranque de 40 a 50 s, con un margen de 5 s es más adecuado.

2.4.13.2 Dispositivo 55-Relé de factor de potencia.

El dispositivo 55 es un relé que funciona cuando el factor de potencia en un circuito de corriente alterna se eleva por encima o por debajo de un valor predeterminado.

Este dispositivo detecta la pérdida de sincronismo de un motor síncrono, que es causada por el aumento o disminución de la carga de excitación. La pérdida de sincronismo hace al motor salir de paso en el sistema de suministro, produciendo pulsos de altas corrientes de línea y posibles daños al motor.

Algunos de los relés y sistemas utilizados tienen un ajustable rango del ángulo de factor de potencia y de retardo de tiempo. El accionamiento de relé se puede utilizar para eliminar el motor síncrono de la línea (o en casos especiales, para operar una alarma). Por lo general, se fija o se conecta a un par máximo de cierre de contacto cuando la corriente en el motor retrasa su posición de factor de potencia a 120-150 grados. Esto podría operar para las condiciones que se producen cuando el motor pierde sincronismo, o cuando el campo del motor síncrono se pierde. El tiempo de retardo mínimo se ve favorecido, pero la duración de los efectos transitorios se debe considerar al realizar el ajuste de tiempo de retardo.

La mayoría de los relés de ángulo del factor de potencia no se ponen en servicio hasta que el motor ha alcanzado la velocidad de sincronización y el campo se ha aplicado. Un dispositivo de temporización en el circuito del relé logra esto. El temporizador permite poner en funcionamiento la protección después que el sincronismo haya sido realizado.

2.4.13.3 Dispositivo 87 - Relés de protección diferencial.

Dispositivo 87 es un relé de protección que funciona en un porcentaje, ángulo de fase, o de otra diferencia cuantitativa de dos corrientes o de otras cantidades eléctricas.

El relé de porcentaje diferencial utilizado para la protección del motor no requiere de un ajuste muy riguroso que un relé de sobrecorriente. Un ajuste de 10 % generalmente se utiliza, un 25 % es preferible donde no exista la misma impedancia, burden en los relés conectados para esta protección. Se debe tener cuidado para asegurarse de que el transformador de corriente y las bobinas de relé están conectados correctamente, y puede ser deseable comprobar la pendiente característica del relé.

De vez en cuando, relés de sobrecorriente de inducción ordinarios están conectados en un circuito diferencial para proporcionar una protección diferencial para un motor. En tal caso, el ajuste del relé se debe seleccionar para dar la sensibilidad deseada. El valor debe estar en el rango de 10 % a 20 % de la corriente del motor a plena carga,

siempre que la relación del transformador de corriente y el tap de corriente mínima del relé permitan un ajuste de este rango. Un valor de tiempo de retardo típico es de 0,1 s. Para los regímenes diferenciales de flujo de equilibrio, los relés deben fijarse de acuerdo con las instrucciones para la configuración de dispositivos 50G.



CAPITULO III

CAPITULO III

3 MARCO METODOLOGICO.

Este capítulo detalla de manera general el proceso de fabricación de Harina cruda (crudo), las características eléctricas principales como: sectores del área, niveles de voltaje y potencias, diagramas unifilares. Así como la metodología que se usó para diseñar la nueva protección eléctrica.

3.1 Descripción general de Holcim ecuador planta Guayaquil.¹⁷

Holcim Ecuador S.A. Planta Guayaquil es una empresa que se dedica a la fabricación de cemento con diferentes tipos de especificaciones, características y usos, el cual se comercializa a diferentes clientes.

3.1.1 Historia.

El 29 de marzo de 1921 se constituyó la Compañía Anónima Industrias y Construcciones. Dos años más tarde la primera planta cementera del país, empezó a funcionar, asentada en un área de 6.600 m², en la localidad de San Eduardo junto a los depósitos de caliza y arcilla de alta calidad. En 1923, la planta industrial producía 3.000 T.M. anuales de cemento portland.

Un cambio en el grupo accionario de la empresa, generó una nueva razón social: La Cemento Nacional C.A.

El crecimiento experimentado por el país, a inicios de los años cuarenta, hizo necesarias una serie de ampliaciones a la planta, que significan la incorporación de nuevos hornos y la modernización de los existentes, habiéndose de esta manera, incrementando la capacidad de producción de 20.000 T.M. anuales en 1942 a 375.000 T.M. anuales a fines de 1968.

¹⁷ Holcim-Ecuador. (2010). Proceso de fabricación de Cemento. Guayaquil, Guayas, Ecuador.

La década de los setenta estuvo caracterizada en el Ecuador por el predominio del sector estatal en la economía. La Cemento Nacional se convirtió en una empresa mixta con mayoría accionaria de la Corporación Financiera Nacional. A pesar de estos cambios societarios la administración se mantuvo bajo la responsabilidad del sector privado.

El grupo cementero internacional Holderbank (hoy llamado Holcim) realizó en 1976 una importante compra de acciones a los inversionistas privados, abriendo con su ingreso a la empresa, las puertas a tecnología de avanzada y a la asesoría de alta calidad en la industria de cemento.

Con el ingreso de Holderbank se dio un impulso adicional para la terminación de la nueva planta Cerro Blanco, asentada en el Km. 18 de la Vía Guayaquil-Salinas. En 1978 se concluyó la instalación de la línea 1 en Cerro Blanco, con la cual, la capacidad total de producción aumentó a 925.000 T.M. anuales de cemento.

En los años noventa la línea 1 recién inaugurada en Cerro Blanco, la empresa decidió proceder a la instalación de una segunda línea de producción que fue inaugurada en 1981. Con esta expansión la capacidad total de producción alcanzó 1'400.000 T.M. anuales de cemento.

La eliminación del control de precios en la década de los noventa generó en los accionistas la confianza para seguir invirtiendo en la empresa. Como consecuencia, en mayo de 1993, se concluye el proyecto de modernización del horno 1. Con estas modificaciones La Cemento Nacional está en capacidad de producir 1'850.000 T.M. de cemento anuales, cumpliendo altos estándares de calidad y protección ambiental. La preocupación de la empresa por satisfacer la posible demanda futura y la política de optimización continua de sus procesos industriales, trajo consigo la instalación de un molino de crudo de nueva generación.

Este molino, tipo vertical de rodillos, el más moderno de América Latina, fue puesto en marcha a partir de Noviembre de 1995 y permitió ampliar la capacidad instalada de producción a 2'300.000 T.M. anuales.

Ilustración 6 Molino vertical para industria de Cemento.



Fuente: Archivo de Fotografías Holcim, 2012.

En Octubre de 1995 la Junta General de Accionistas decidió entregar la operación de producción de cemento a una nueva empresa Cementos Rocafuerte, Rocafort S.A.

En el año 2001 el nombre del Grupo suizo Holderbank fue cambiado a Holcim. Hoy en día la presencia internacional de Holcim consiste en una equilibrada mezcla de compañías tanto en mercados emergentes así como en mercados de avanzada, y tiene su enfoque principal en la gente que trabaja en la organización, pues para Holcim más importante que la tecnología, o que la misma producción de sus plantas, son sus empleados.

A mediados del 2004, La Cemento Nacional C.A. ingresa en cambios a todo nivel. Desde octubre de ese año se endosa la razón social de La Cemento Nacional por Holcim Group (Grupo Holcim), así mismo la Ilustración de su logotipo cambia en cada uno de los productos de la marca. Siendo la presentación del saco de cemento Rocafuerte su producto principal.

Ilustración 35 Logo de la Cemento Nacional.



Fuente: Archivo de Fotografías Holcim, 2012.

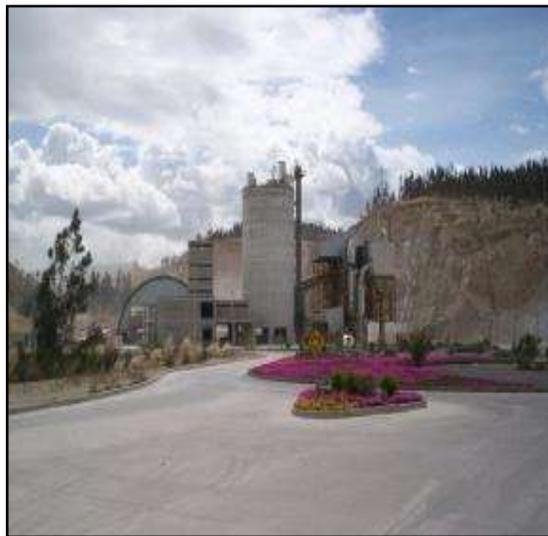
Ilustración 36 Logo de la Corporación Holcim S.A.



Fuente: Archivo de Fotografías Holcim, 2012.

Contamos también con la Planta San Rafael en Latacunga, que fue inaugurada en el año 2006 como se muestra en la Ilustración 37, y la cual produce anualmente 700.000 T.M. de cemento, abasteciendo así a la región Sierra de nuestros productos.

Ilustración 37 Planta San Rafael en Latacunga.



Fuente: Archivo de Fotografías Holcim, 2012

3.1.2 Funcionamiento general.

Control central es el corazón de la planta, donde las operaciones de los equipos se las hacen de manera remota a través del sistema scada.

Cada línea de producción tiene un técnico de operaciones que controla desde la alimentación de la piedra caliza hasta el almacenamiento de cemento a los silos. Este personal labora en tres turnos las 24 horas del día los 365 días del año.

La garantía de la estabilidad de la operación y producción ha mejorado en los últimos años mediante el uso del sistema automático linkman, este sistema se lo está utilizando en nuestros equipos principales: hornos y molinos.

El sistema linkman es como un piloto automático que puede llevar el control cuando todo está estable, pero si hay alguna anomalía no se puede controlar lo que está pasando. Es por ello que este sistema no reemplaza al operador, es simplemente un complemento muy importante en proceso de fabricación del cemento.

En el proceso de fabricación del cemento la primera etapa es la extracción de la materia prima.

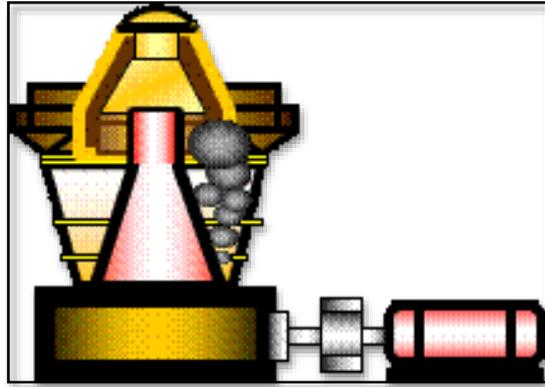
Las materias primas para la elaboración de la harina de crudo que luego será materia prima de cemento son:

- Piedra caliza
- Arcillas
- Arena ferrosa
- Fluorita
- Puzolana

La piedra caliza se la obtiene de la cantera la misma que está sometida a doble trituración:

- La trituración primaria que reduce el tamaño inicial de hasta 1.5 metro a unos 250mm, a razón de 1500 ton. por hora.

Ilustración 38 Mímico de la Trituradora Primaria.



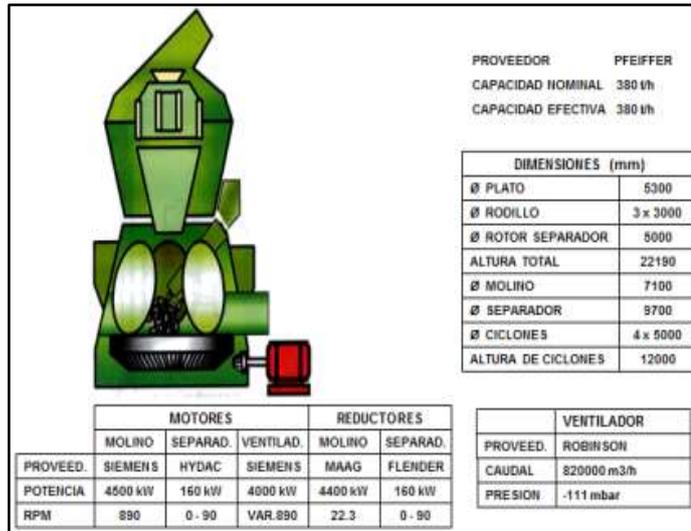
Fuente: Archivo de Fotografías Holcim, 2012

- La trituración secundaria reduce finalmente el tamaño de la piedra caliza de 250mm a 100mm aproximadamente.

Después de la trituración de la piedra caliza siendo esta la materia principal para la harina de crudo, a este proceso que continua se lo conoce como molienda de harina de crudo. En el cual la caliza, las arcillas y la arena ferrosa son dosificadas y transportadas a través de bandas desde las tolvas de alimentación hasta el molino vertical de crudo con una capacidad de 380 T.M.H, de crudo.

En el interior del molino los materiales son pulverizados por acción de la presión ejercida por los rodillos sobre la mesa giratoria. El producto es simultáneamente secado por los gases calientes provenientes de los hornos, los cuales además transportan el polvo a través de un separador de alta eficiencia y luego pasa por los multiciclones, donde es separado y enviado a los silos de homogenización para el almacenamiento de crudo.

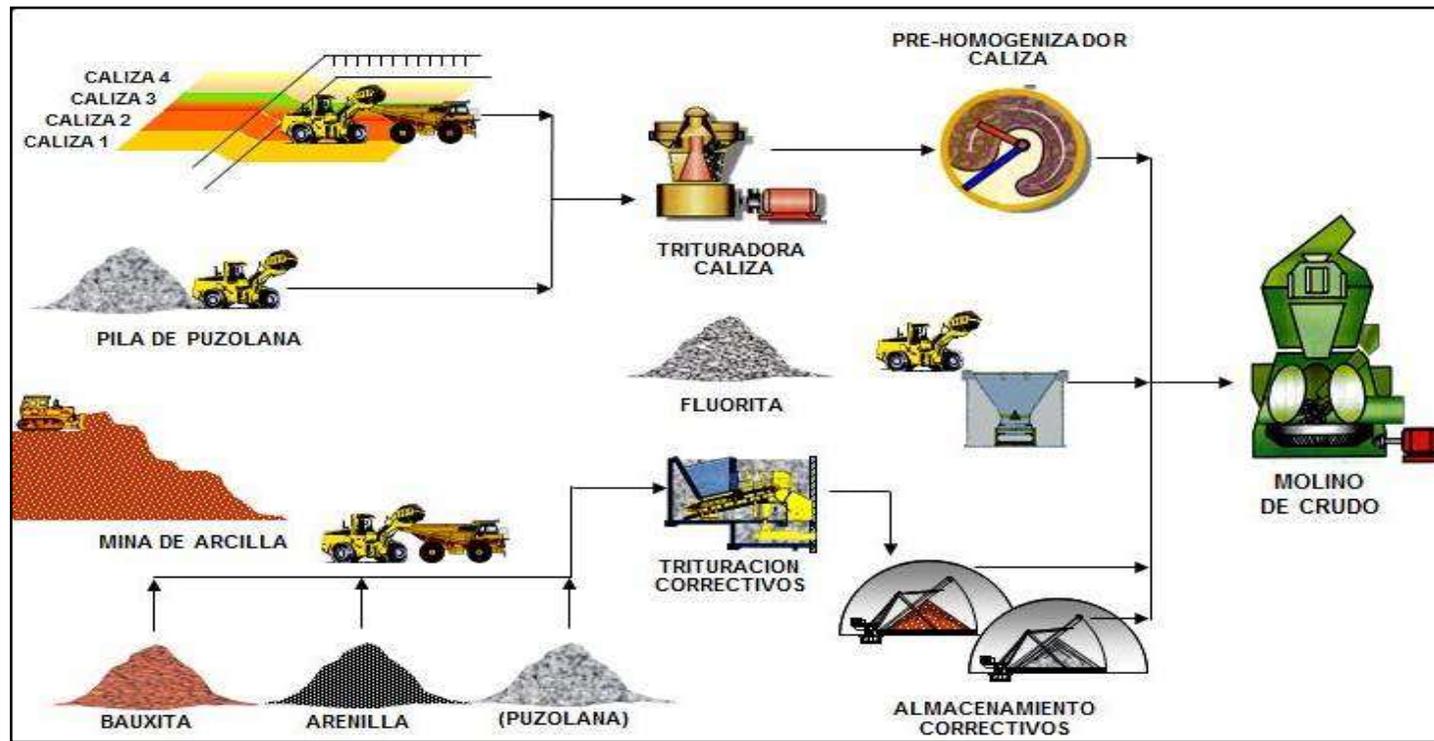
Ilustración 39 Ficha técnica de la Molino Vertical de Crudo.



Fuente: Archivo de Fotografías Holcim, 2012

El motor del molino vertical de crudo es de 4400 kW (es el motor el más grande de la planta). Un ventilador de 4000 kW permite aspirar el crudo del molino hasta los multiciclones.

Ilustración 40 Proceso de fabricación de Crudo.



Fuente: Archivo de Fotografías Holcim, 2012

3.2 Descripción del área de Molino de Crudo de Bolas.

Adicional al molino vertical de Crudo, tenemos un molino de bolas de crudo que es un subproceso. Si el molino vertical de crudo está funcionando el molino de bolas de crudo puede funcionar. Cuando los dos molinos están en funcionamiento la producción de harina cruda llega a 500 T.M.H.

El material que no logra pasar por el separador del molino vertical de crudo es extraído por un gusano sin fin hacia una rotatoria, luego transportado por una banda hacia el molino de crudo de bolas que finalmente este molino lo termina de refinar para luego unirse con el producto terminado.

Este molino está constituido principalmente por un motor síncrono de 3000KW que es nuestro caso de estudio, además de un separador, un elevador de cangilones y varios canalones para transportar la harina cruda hasta los silos de almacenamiento.

3.3 Descripción del Sistema eléctrico - Planta Holcim.

El sistema eléctrico actual al año 2013 de la planta de cementos Holcim ubicado en el km 18 cerca de la vía a la Costa, es alimentado por el Sistema Nacional Interconectado, por dos alimentaciones independientes. La alimentación principal proviene de una terna de 138 kV de la subestación pascuales, y la alimentación secundaria o de respaldo es alimentado por la terna de Salitral a una tensión de 69kV.

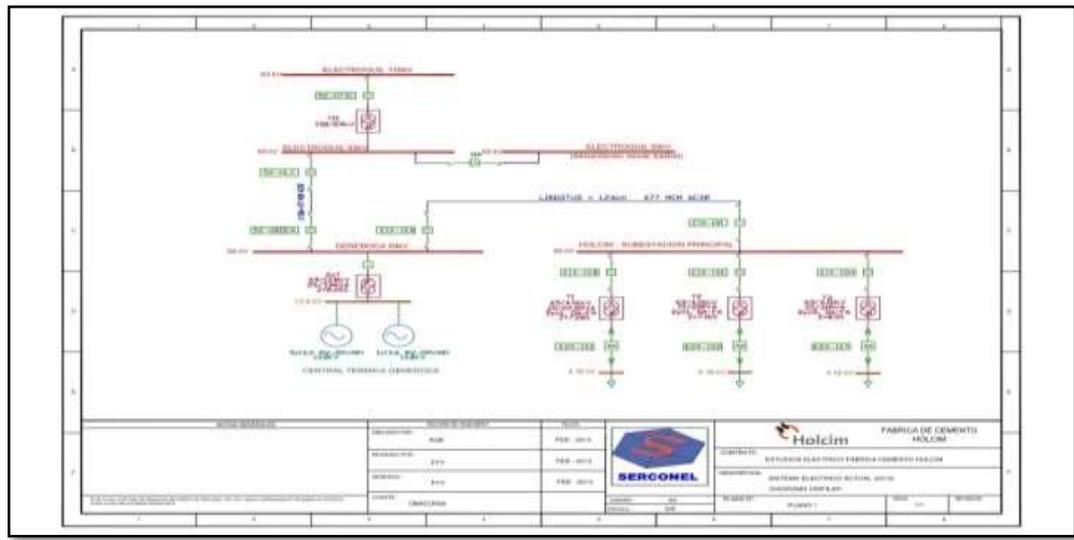
El suministro de energía de la planta Holcim proviene a su vez a través de dos bahías o subestaciones, la primera bahía es una central termoeléctrica de la compañía suministradora Electroquil y es allí donde llega la línea de Pascuales de 138kV a un bus de 138kV Electroquil la cual reduce su tensión por un transformador de potencia denominado TIC de 138/69kV alimentando al bus de 69kV Electroquil.

Existe otra bahía de la compañía generadora termoeléctrica Generoca la cual tiene un bus de voltaje que es suministrada por la línea de Salitral a una tensión de 69kV que es utilizado como transferencia para alimentación secundaria o de respaldo al bus de

69kV Electroquil, y es en este bus que se deriva una terna de alimentación de energía eléctrica a la subestación eléctrica principal Holcim.

A continuación se detalla el diagrama eléctrico unifilar que nos facilita una mejor comprensión del sistema eléctrico de la planta Holcim.

Ilustración 41 Sistema eléctrico unifilar planta Holcim.¹⁸



Fuente: Cortesía de Serconel.

3.4 Datos del sistema eléctrico.

Como se mencionó anteriormente el sistema principal de alimentación de energía eléctrica de la compañía Holcim, es por medio del SNI a 138kV que viene de la subestación eléctrica Pascuales.

Los datos equivalentes de Thevenin del S.N.I en el transformador TIC del lado de 69kV suministrado por el CENACE para el año 2014 son los siguientes.

¹⁸ Se puede visualizar en el anexo A la ilustración para su mayor entendimiento.

Tabla 5 Equivalente del S.N.I. alimentado desde Pascuales.

	Sk	Ik''	Rk0, Re(Zk)	Xk0, Im(Zk)	Rk1, Re(Zk)	Xk1, Im(Zk)	Rk2, Re(Zk)	Xk2, Im(Zk)
GENERAC	MVA	kA	Ohm	Ohm	Ohm	Ohm	Ohm	Ohm
MÁXIMA	637.084	5.331	0.062	3.490	0.608	8.198	0.460	7.077
MÍNIMA	362.982	3.037	0.0785	35.490	22.859	129.156	22.888	129.686

Fuente: Cortesía de Omaconsa.

En condiciones de emergencia se puede alimentar desde el lado de Salitral, donde los equivalentes de Thevenin de la barra de Electroquil, son el siguiente.

Tabla 6 Equivalente del S.N.I. alimentado desde Salitral.

	Sk	Ik''	Rk0, Re(Zk)	Xk0, Im(Zk)	Rk1, Re(Zk)	Xk1, Im(Zk)	Rk2, Re(Zk)	Xk2, Im(Zk)
GENERAC	MVA	kA	Ohm	Ohm	Ohm	Ohm	Ohm	Ohm
MÁXIMA	1.863.22	15.590	0.055	2.505	0.486	2.768	0.464	2.788
MÍNIMA	973.056	8.142	0.0681	25.215	11.205	47.628	11.297	48.388

Fuente: Cortesía de Omaconsa.

3.4.1 Subestación eléctrica principal Holcim.

La subestación eléctrica principal de la planta Holcim, cumple todos los estándares y normas asociados para salas eléctricas, además con todas las normativas impuestas por el estándar de criterio de diseño de Holcim, cumpliendo así con los requisitos de seguridad.

Los equipos de distribución de la subestación principal, cuenta con celdas metal-clad y vac-clad, sus interruptores son contactos al vacío, previniendo la extinción del arco eléctrico durante maniobras de apertura o cierre.

Ilustración 42 Switchgear subestación principal Holcim.



Fuente: Los autores, 2013

En la subestación eléctrica principal de la planta Holcim, existen tres transformadores de potencia, tipo ONAF con un total de capacidad de 60 MVA .que suministra de energía eléctrica toda la planta para el proceso de elaboración de cemento, teniendo una demanda aproximada de 45 MVA.

Cada transformador de potencia reduce la tensión de 69/4,16kV para alimentar un bus de 4,16 kV para la distribución de energía por las diferentes áreas de proceso de la planta por medio de interruptores (switchgear).

Cada transformador dispone de sus protecciones eléctricas, mediante relés electrónicos digitales de protección, como, sobrecorriente de fase y tierra, sobrecorriente instantánea de fase y tierra, protección diferencial por citar algunos.

Tabla 7 Datos nominales transformadores de potencia subestación principal.

Nombre	Referencia	Volt alta [kV]	Volt baja [kV]	Sn [MVA]	Ubicac. Ta	Zcc [%]	Conexió	Rt [Ω]
E1X-1T3	S/E	69	4.16	20/22.4	3	7.28	Dyn1	4
E1X-1T4	S/E	69	4.16	15/20	3	7.16	Dyn1	4
E1X-1T5	S/E	69	4.16	25/31	3	8.5	Dyn5	4

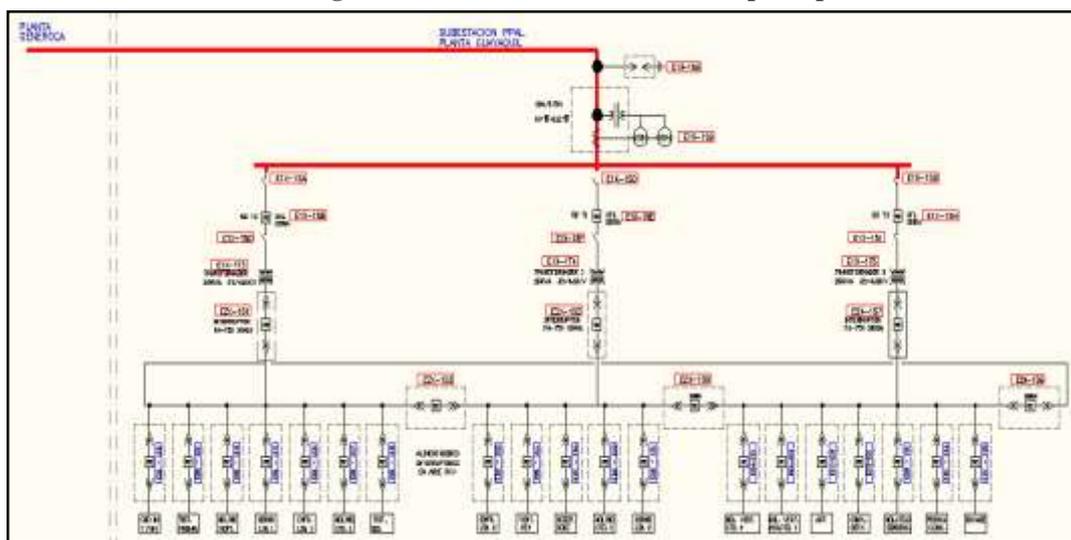
Fuente: Cortesía de Omaconsa.

Existen dos interruptores (switchgear), que sirven de transferencia entre barras, para suministrar energía cuando uno de los tres transformadores de potencia ha sufrido una falla (contingencia), Esta maniobra no es frecuentemente utilizada, y por lo tanto estos interruptores actualmente se encuentran desconectados.

El sistema eléctrico de la subestación principal de Holcim, es un sistema radial, permitiendo la transferencia de energía de un bus del secundario del transformador a otro, cuando se lo requiera.

La siguiente figura muestra el diagrama unifilar eléctrico de la planta, y su distribución de energía por medio de los interruptores (switchgear) a los diferentes procesos o áreas.

Ilustración 43 Diagrama unifilar eléctrico subestación principal Holcim.¹⁹



Fuente: cortesía de Holcim-Ecuador.

3.5 Subestación eléctrica área Molino de Crudo 1.

La alimentación del bus de la sala eléctrica “Molino de Crudo 1” que es nuestro caso de estudio, proviene de un interruptor a vacío marca Cutler Hammer tipo VCP- 50 ubicado en la subestación principal, este alimenta la barra de la subestación del

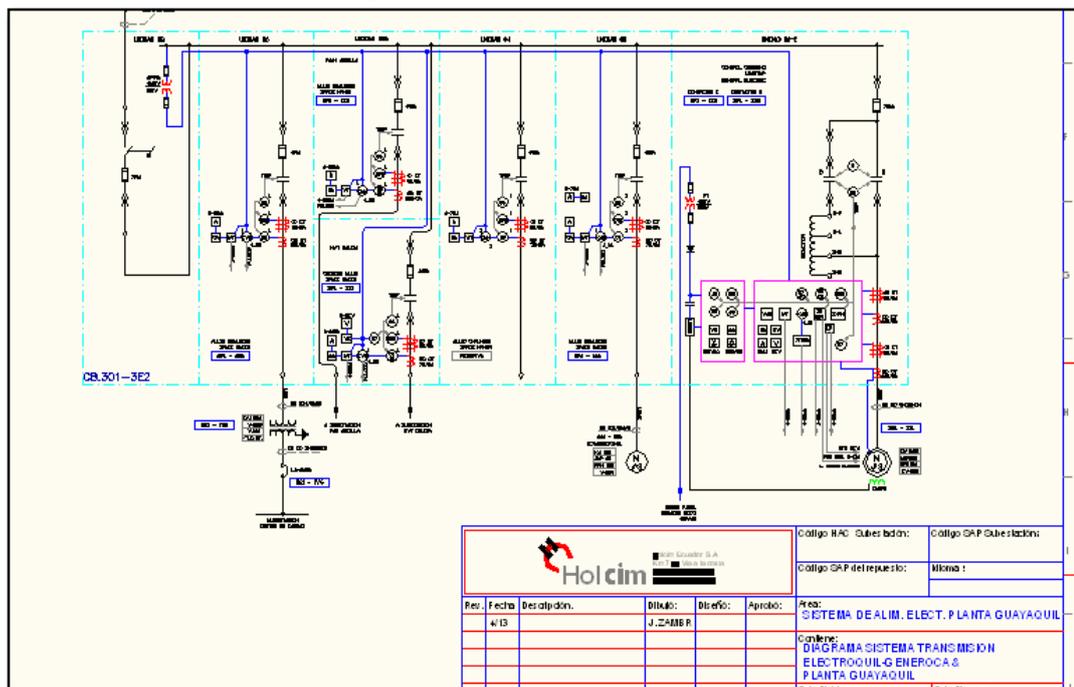
¹⁹ Se puede visualizar en el anexo B la ilustración para su mayor entendimiento.

molino de Crudo 1 a un nivel de tensión de 4,16kV a una capacidad de 1200 amperios.

En esta subestación se encuentra, la alimentación del motor síncrono definido por el código HAC CB.361-1X3 al cual se pretender realizar el ajuste de protecciones mediante un relé de protecciones General Electric SR469. Además existen otras cargas asociadas a este bus principal de la subestación de Crudo1, como el motor del separador del molino denominado CB.361-SP2, interruptores de alimentación de transformadores de 1000KVA para equipos auxiliares como el área de MVT de piedra, Sala FAM, y equipos auxiliares del molino de Crudo 1.

A continuación se detalla el diagrama unifilar eléctrico de dicha subestación.

Ilustración 44 Diagrama unifilar subestación molino de Crudo.



Fuente: cortesía de Holcim-Ecuador.

3.6 Equipos usados para el cálculo de cortocircuito del sistema.

Para el ajuste de protección del motor, se debió considerar la corriente de cortocircuito del sistema, ya que dicho análisis nos facilita conocer el nivel de

corriente de cortocircuito mínimo y máximo y así poder verificar el nivel de interrupción de los equipos ya instalados y ajustar los relés de protección del motor.

A continuación se detalla brevemente definiciones de los equipos que intervienen en el análisis de cortocircuito.

3.6.1 Interruptores (Switchgear).

El interruptor (switchgear) que alimenta el bus principal de los diferentes interruptores que van alimentar las subestaciones de los diferentes áreas o proceso, está ubicado en la subestación principal de planta, este interruptor es un equipo de marca Cutler Hammer modelo VCP-W, son interruptores al vacío para su extinción del arco eléctrico, y su cubículo es vac-clad y metal-clad cumpliendo las normas IEEE, NEMA y ANSI, estos interruptores tienen como datos nominales de placa voltaje 4,76kV a corrientes máximas de 3000A, y un nivel de interrupción de 41kA y están protegidos mediante un relé digital por sobrecorriente 50P y 50G marca Siemens modelo 7SJ602.

Ilustración 45 Interruptor 3000A alimentación bus subestación principal.



Fuente: Los autores, 2013

Existen otros interruptores denominados celdas alimentadoras que alimentan los buses de las diferentes subestaciones eléctricas de los diferentes procesos en la planta, estas celdas, son similares a la anterior descrita, ya que su única diferencia radica en la capacidad nominal de corriente a 1200 amperios y su nivel de interrupción a 49 kA a un nivel de tensión 4,76 kV.

Ilustración 46 Placa Interruptor 1200A alimentación bus subestación principal.



Fuente: Los autores, 2013

Ilustración 47 Interruptor 1200A alimentación diferentes subestaciones de proceso.



Fuente: Los autores, 2013

3.7 Relés digitales de protección.

3.7.1 Conceptos generales.

El objetivo de un sistema de protección, es la de eliminar completamente la falla del sistema en el menor tiempo posible, previniendo que se produzcan daños al sistema, y a las personas.

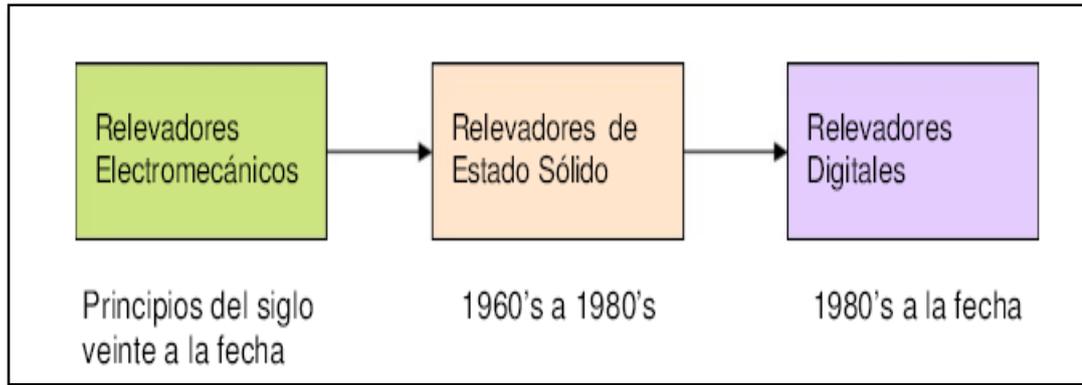
Los relevadores de protección con microprocesadores, también conocidos como relés digitales, son comúnmente instalados en los sistemas de potencia y en motores de grandes capacidades en la actualidad, reemplazando a los relés electromecánicos, debido a su tiempo de respuesta y confiabilidad ante una falla, son dispositivos con diferentes capacidades, realizando tareas de protección, medición, control y supervisión.

Los relés digitales de protección, disponen de muchos algoritmos, que permiten al ingeniero eléctrico realizar un ajuste más sencillo, debido a que estos relés de nueva generación con tecnología digital se ajustan a las condiciones prevalientes de un sistema eléctrico, haciendo el uso de redes de inteligencia artificial, para detectar con mayor precisión, la presencia de un fallo en el sistema.

Los antecesores de los relés digitales, eran los relés electromecánicos, su principio es diferente, debido a las diferentes tecnologías que se usan.

Se detalla a continuación la evolución histórica de los relés de protección.

Ilustración 48 Evolución de los relés de protección.



Fuente: www.scribd.com. 2013

Los relés de protección, a los cuales se tomaron lectura de las protecciones habilitadas, fue el relé de protección Cutler Hammer modelo Digitrip3000 que está en el interruptor de alimentación del bus de la subestación eléctrica “Molino de Crudo 1” esta celda es ubicada en la subestación principal de planta y está asignada con el código de activos de Holcim (HAC, Holcim Active Code) CB.E21-1S7.²⁰

Estos datos obtenidos son de suma importancia, debido que permite verificar si existe coordinación entre los ajustes del relé de protección digital SR469 de General Electric a implementarse para la protección del motor síncrono del molino de bolas de Crudo que es el caso de estudio, con el relé aguas arriba denominado como protección secundaria que está ubicado en la celda de la subestación principal de planta.

Un mal ajuste en el relé de protección del motor, puede hacer que mediante la presencia de un fallo en el área que protege el relé del motor, dispare con anterioridad el relé aguas arriba provocando una mala coordinación, además de no despejar solo la parte afectada del sistema eléctrico.

A continuación se detallan en la siguiente tabla las protecciones habilitadas de los relés antes mencionados.

²⁰ Código de activo De Holcim: código para describir un activo de la empresa y definir sus costos por sub-procesos.

Tabla 8 Ajustes relé de protecciones alimentador de subestación de Crudo1 y principal.

LOCATION	CODIGO HAC	DESCRIPCION	RELE	MARCA	MODELO	CT RATIO	DEVICE NUMBER	PICKUP(AMP)			INST. PICKUP(AMP)		
								CURVA	PICKUP(pu)	TIME DIAL	CURVA	PICKUP(pu)	TIME DIAL
S/E PCPAL	E2X-1S8	ENTRADA DEL TRAF0 20MVA	R1	SIEMENS	7S/602	300/5	51	INVERSO	3,4	0,01sg			
							50				INVERSO	3,4	0,01sg
							50				INVERSO	3,4	XX
							100/5	50G			INVERSO	1,55	0,01sg
S/E PCPAL	E2X-1S1	SALIDA DEL TRAF0 20MVA	R2	SIEMENS	7S/602	4000/5	51	INVERSO	3,6	0,01sg			
							50				INVERSO	3,6	0,01sg
							50				INVERSO	3,6	XX
							100/5	50G			INVERSO	0,08	0,01sg
S/E PCPAL	E21-1S2	ALIMENTAD OR MOLINO CRUDO 1	R3	CUTLER HAMMER	DIG/TRIP 3000	1200/5	51	IT	0,5	3			
							50				IT	1	1,5
							50				IT	3	XX
						50/5	51G	IT	0,2	3			
							50G				IT	0,75	1
							50G				IT	1	XX

Fuente: Los autores, 2013

Estos ajustes están actualmente programados en los relés mencionados en la tabla, más adelante verificaremos si existe una buena coordinación del relé de protección del motor síncrono con el relé aguas arriba que alimenta el bus de la subestación eléctrica de Crudo 1.

3.8 Cálculo de corrientes de cortocircuito.

Para el cálculo de las corrientes de cortocircuito del sistema, se utilizó el programa de análisis computarizado ETAP 7,5.

El programa de Análisis de Cortocircuito ETAP analiza el efecto de fallas trifásicas, de línea a tierra, línea a línea y de dos líneas a tierra en los sistemas de distribución eléctrica. El programa calcula las corrientes totales de corto circuito, así como las contribuciones de los distintos motores, generadores, y la generación en el sistema.

ETAP ofrece dos métodos de cálculo de cortocircuito en base a la norma ANSI / IEEE e IEC. Puede seleccionar el método de cálculo en el editor de caso de estudio de la barra herramienta del programa ETAP.

El método utilizado para el cálculo de corrientes de cortocircuito del sistema eléctrico Holcim fue el estándar ANSI IEEE. En particular, el estándar proporciona cálculos para etapas de corriente de falla a 1/2, 1.5-4, y 30 ciclos.

El análisis de fallos están en conformidad con las últimas ediciones de las normas ANSI / IEEE (serie C37) e IEC (IEC 60909 y otros).

Tabla 9 Lista de estándar IEEE-UL para el cálculo de corrientes de cortocircuito.

Standard	Pub. Year	Title
IEEE C37.04	1979 (1988)	Standard Rating Structure for AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis and Supplements
IEEE C37.04f	1990	
IEEE C37.04g	1986	
IEEE C37.04h	1990	
IEEE C37.04i	1991	
IEEE C37.04	1999	
IEEE C37.010	1979, 1988, 1999	Standard Application Guide for AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis and Supplements
IEEE C37.010b	1985	
IEEE C37.010e	1985	
IEEE C37.010	1999	
IEEE C37.13	1990	Standard for Low-Voltage AC Power Circuit Breakers Used in Enclosures
IEEE C37.013	1997	Standard for AC High-Voltage Generator Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis
IEEE C37.20.1	1993, 2002	Standard for Metal Enclosed Low-Voltage Power Circuit Breaker Switchgear
IEEE Std 399	1990 & 1997	Power System Analysis – the Brown Book
IEEE Std 141	1986, 1993, 2002	Electric Power Distribution for Industrial Plants – the Red Book
IEEE Std 242	1986 & 2001	IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems – the Buff Book
UL 489_9	1996, 2000, 2002	Standard for Safety for Molded-Case Circuit Breakers, Molded-Case Switches, and Circuit-Breaker Enclosures

Fuente: Etap help 7.

3.8.1 Definición de términos.

Los siguientes términos son útiles para comprender los cálculos de corto circuito utilizando ANSI / IEEE.

3.8.1.1 Red ½ Ciclo.

Esta red se utiliza para el cálculo de corrientes de cortocircuito momentáneas y la capacidad de interrupción de los interruptores para soportar estas magnitudes momentáneas de corriente. En la siguiente tabla se muestra el tipo de dispositivo y sus funciones asociadas que utilizan la red de ½ ciclo.

Tabla 10 Tipo de dispositivo y funciones asociadas a la red de medio ciclo.

<u>Type of Device</u>	<u>Duty</u>
High voltage circuit breaker	Closing and latching capability
Low voltage circuit breaker	Interrupting capability
Fuse	Interrupting capability
Switchgear and MCC	Bus bracing
Relay	Instantaneous settings

½ Cycle Network Duty

Fuente: Etap help 7.5.

La red de ½ ciclo también se conoce como la red subtransitoria, principalmente porque todas las máquinas rotativas están representados por su reactancia subtransitoria, como se muestra en la tabla siguiente.

Tabla 11 Impedancia subtransiente red de medio ciclo.

Type of Machine	X _d ^{''}
Utility	X _d ^{''}
Turbo generator	X _d ^{''}
Hydro-generator with amortisseur winding	X _d ^{''}
Hydro-generator without amortisseur winding	0.75 X _d ^{''}
Condenser	X _d ^{''}
Synchronous motor	X _d ^{''}
Induction Machine	
> 1000 hp @ 1800 rpm or less	X _d ^{''}
> 250 hp @ 3600 rpm	X _d ^{''}
All other ≥ 50 hp	1.2 X _d ^{''}
< 50 hp	1.67 X _d ^{''}

1/2 Cycle Network Impedance

(X_d^{''} = 1/LRC for induction motors)

Fuente: Etap help 7.5.

3.8.1.2 Red 1 ½ - 4 Ciclo.

Esta red se utiliza para calcular la corriente de cortocircuito de interrupción de los dispositivos de protección a 1.5-4 ciclos después de la falla. En la siguiente tabla se muestra el tipo de dispositivo y sus funciones asociadas en la red de 1.5-4 ciclos.

Tabla 12 Tipo de dispositivo y funciones asociadas a la red de 4 ciclos.

Type of Device	Duty
High voltage circuit breaker	Interrupting capability
Low voltage circuit breaker	N/A
Fuse	N/A
Switchgear and MCC	N/A
Relay	N/A

1.5-4 Cycle Network Duty

Fuente: Etap help 7.5.

La red de 1,5-4 ciclo también se conoce como la red transitoria. El tipo de máquina y su representación de rotación se muestra en la tabla siguiente:

Tabla 13 Impedancia red de 4 ciclos.

Type of Machine	X_{sc}
Utility	X''
Turbo generator	X'_d
Hydro-generator with amortisseur winding	X'_d
Hydro-generator without amortisseur winding	$0.75 X'_d$
Condenser	X'_d
Synchronous motor	$1.5 X'_d$
Induction machine	
> 1000 hp @ 1800 rpm or less	$1.5 X'_d$
> 250 hp @ 3600 rpm	$1.5 X'_d$
All other ≥ 50 hp	$3.0 X'_d$
< 50 hp	Infinity

1.5-4 Cycle Network Impedances

(X'_d = LLRC for induction motors)

Fuente: Etap help 7.5.

3.8.1.3 Red de 30 ciclos.

El tipo de maquina rotatoria en la red de 30 ciclos es considerada en la tabla mostrada a continuación. Máquinas de inducción, motores síncronos, condensadores no son consideradas en el cálculo de falla de 30 ciclos:

Tabla 14 Impedancia red de 30 ciclos.

Type of Machine	X_{sc}
Utility	X''
Turbo generator	X'_d
Hydro-generator with amortisseur winding	X'_d
Hydro-generator without amortisseur winding	X'_d
Condenser	Infinity
Synchronous motor	Infinity
Induction machine	Infinity

30 Cycle Network Impedance

Fuente: Etap help 7.5.

3.8.1.4 Factor multiplicación ANSI.

El factor de multiplicación ANSI se determina por la relación del sistema equivalente X / R en una particular ubicación de la falla. La relación X / R se calcula por las redes de R y X separadas.

3.9 Metodología programa ETAP 7.5.

3.9.1 Barra de herramienta de cortocircuito ANSI.

Esta barra de herramientas está activa cuando está en el modo de cortocircuito y la norma se establece en ANSI en el editor de caso de estudio de cortocircuito en el programa ETAP 7.5.

Imagen 7 Barra de herramienta de cortocircuito por norma ANSI.



Fuente: Etap help 7.5



3.9.1.1 Fallos trifásicos (device duty).

En este botón de la barra de herramientas realiza un estudio de falla trifásica regido por la norma ANSI C37. Este estudio calcula corrientes de cortocircuitos simétricas y asimétricas momentáneas, y corrientes de interrupción simétricas en los buses en fallas El programa verifica la capacidad momentánea en el dispositivo de protección y ajusta la capacidad de interrupción contra fallas.



3.9.1.2 Fallos LG, LL, LLG, y de 3 fases - ½ ciclo (máx. corriente de cortocircuito).

Este botón permite realizar estudios de falla de línea a tierra, línea a línea, línea a línea-tierra por la norma ANSI, Este estudio calcula las corrientes de cortocircuito en sus valores eficaces a ½ ciclo en buses con falla, estos valores son considerados como los valores máximos de corrientes de cortocircuito.

Generadores son modelados por su reactancia subtransitoria de secuencia positiva, negativa y cero y los motores son modelados por su reactancia transitoria de secuencia positiva, negativa y cero. Conexiones de generadores, motores, transformadores son tomadas en consideración cuando se construyen redes de secuencia positiva, negativa y cero.



3.9.1.3 Fallos LG, LL, LLG, y de 3 fases - 1,5 a 4 Ciclo.

Este botón permite realizar estudios de falla de línea a tierra, línea a línea, línea a línea -tierra, y los estudios de fallas trifásicas por las normas ANSI. Este estudio calcula las corrientes de cortocircuito en sus valores eficaces entre 1,5 a 4 ciclos en buses con fallas.

Generadores y motores son modelados por su reactancia subtransitoria de secuencia positiva, negativa y cero. Conexiones de generadores, motores, transformadores son tomadas en consideración cuando se construyen redes de secuencia positiva, negativa y cero.



3.9.1.4 Fallos LG, LL, LLG, y de 3 fases - 30 ciclos (mín. corriente de cortocircuito).

Este botón permite realizar estudios de falla de línea a tierra, línea a línea, línea a línea -tierra, y los estudios de fallas trifásicas por las normas ANSI. Este estudio calcula las corrientes de cortocircuito en sus valores eficaces de 30 ciclos en buses

con fallas. Estos valores son considerados como las corrientes mínimas de cortocircuito.

Los generadores son modelados por su reactancia de secuencia positiva, negativa y cero y las contribuciones de corrientes de cortocircuito de motores son ignoradas. Conexiones de generador, motores, transformadores son tomadas en consideración cuando se construyen redes de secuencia positiva, negativa y cero.

3.10 Descripción General de la Metodología de Cálculo.

En el cálculo de corrientes de cortocircuito por la norma ANSI / IEEE, una fuente de tensión equivalente a la ubicación de la falla, que es igual a la tensión de pre-falla en el lugar, sustituye a todas las fuentes de tensión externas y fuentes de tensión interna de la máquina.

Todas las máquinas están representadas por sus impedancias internas. Capacitancias de línea y cargas estáticas no se toman en consideración. El programa permite ajustar las características de los transformadores, como impedancia, el % de tap del transformador y se puede especificar y ajustar si son transformadores LTC. Se supone que para un fallo trifásico, las resistencias de arco no se consideran. Se puede especificar la impedancia de falla para el caso de estudio de cortocircuito para un fallo de una fase a tierra. Las impedancias del sistema son asumidas como equilibrada, y el método de las componentes simétricas se utiliza para los cálculos de falla desequilibrada.

Tres redes de impedancia diferentes se forman para calcular corrientes de cortocircuito momentáneas, de interrupción y de estado estacionario. Estas redes son : Red de $\frac{1}{2}$ ciclo (red subtransitoria) , red de 1.5-4 ciclo (red transitoria) , y red de 30 ciclo (red en estado estacionario) .

El estándar ANSI / IEEE recomiendan el uso de redes de R y X por separado para calcular los valores X / R. Una relación X / R se obtiene para cada falla individual en el bus y la corriente de cortocircuito. Esta relación X / R se utiliza entonces para

determinar el factor de multiplicación para tener en cuenta la componente dc en una falla asimétrica.

Usando las redes de $\frac{1}{2}$ y 1.5-4 ciclo, se resuelven primero el valor eficaz simétrico de las corrientes de cortocircuito momentáneo y de interrupción. Estos valores se multiplican luego por los factores de multiplicación correspondiente (X/R) para obtener finalmente valores de corrientes de cortocircuito simétrico momentáneo y de interrupción.

Para realizar el estudio de cálculo de cortocircuito en el circuito eléctrico de la planta Holcim, específicamente en el bus 6 que alimenta el motor síncrono con código HAC CB.361-1X3, es necesario, la recopilación de datos de los elementos principales que componen el sistema eléctrico.

A continuación se detallan los datos necesarios para realizar el cálculo de cortocircuito:

3.10.1 Datos del bus.

Los datos necesarios del bus para el cálculo de cortocircuito son los siguientes:

- Voltaje nominal (kV) .Cuando la opción de pre-falla de tensión está configurado para utilizar como tensión nominal.
- % V. Cuando la opción de pre-falla de tensión está configurado para utilizar la tensión del bus.
- Tipo (tales como MCC, interruptores, etc.) y su nivel de aislamiento.

Ilustración 49 Configuración datos del bus en Etap7.5.

4,16 kV 1200 Amps Asymmetrical 78 kA

Info

ID: Nominal kV: In Service Out of Service

Bus Voltage

	% V	kV	Angle
Initial	<input type="text" value="100"/>	<input type="text" value="4.16"/>	<input type="text" value="0"/>
Operating	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>

Connection

3 Phase
 1 Phase 2W
 1 Phase 3W

Fuente: Los autores, 2013.

3.10.2 Fuente o utilidad (Power data grid).

Datos necesarios para el cálculo de cortocircuito de la generación o fuente incluyen:

- Voltaje nominal (kV).
- % V y ángulo.
- Potencia de cortocircuito trifásico (MVA) sc y la relación X/R.

Para los cálculos de cortocircuito desequilibradas, también necesitará:

- Conexión a tierra tipos y parámetros.
- Potencia de cortocircuito monofásico (MVA) sc y la relación X / R.

Ilustración 50 Configuración datos de fuentes en Etap7.5.

SC Rating

	MVA _{sc}	X/R	kA _{sc}
3-Phase	<input type="text" value="354,138"/>	<input type="text" value="5,695"/>	<input type="text" value="2,963"/>
1-Phase	<input type="text" value="156,141"/>	<input type="text" value="47,054"/>	<input type="text" value="1,306"/>

SC Imp. (100 MVA base)

	% R	% X
Pos.	<input type="text" value="4,88359"/>	<input type="text" value="27,8121"/>
Neg.	<input type="text" value="4,88359"/>	<input type="text" value="27,8121"/>
Zero	<input type="text" value="2,89226"/>	<input type="text" value="136,092"/>

Fuente: Los autores, 2013.

3.10.3 Datos de motores síncronos.

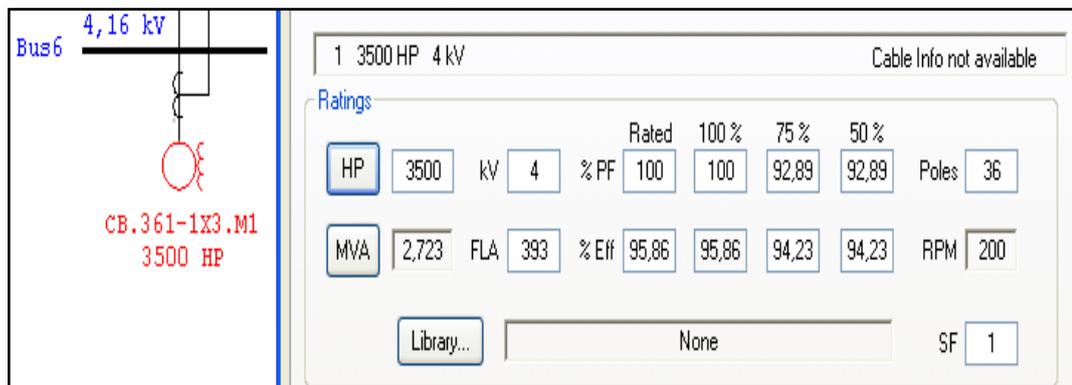
Datos necesarios para el cálculo de cortocircuito para motor síncrono incluye:

- Potencia (kW).
- Voltaje (kV).
- Reactancia subtransitoria (X_d'').
- Relación X / R.
- Corriente de rotor bloqueado (% LRC).
- Numero de polos.

Para los cálculos de cortocircuito desequilibradas, también necesitará:

- Conexión a tierra tipos y parámetros.
- X_0 (Secuencia Cero impedancia).
- X_2 (impedancia de secuencia inversa).

Ilustración 51 Configuración datos de motores en Etap7.5.



Fuente: Los autores, 2013.

3.10.4 Datos del fusible.

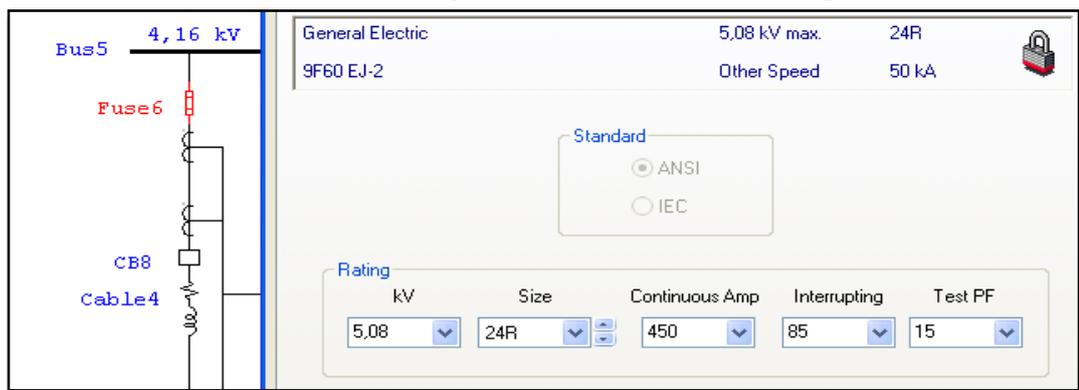
Datos necesarios para el cálculo de cortocircuito para los fusibles incluye:

- Fusible ID

Datos del fusible por el estándar ANSI:

- Voltaje nominal del fusible (kV).
- Capacidad de interrupción.
- Prueba PF

Ilustración 52 Configuración datos de fusibles en Etap7.5.



Fuente: Los Autores, 2013.

3.10.5 Datos de cables alimentadores.

Los datos necesarios para el cálculo de cortocircuito para cables son los siguientes:

- Tipo de conductor (cobre o aluminio).
- Voltaje nominal (kV).
- Ampacidad (A).
- Aislamiento.
- Calibre del conductor.
- Números de conductores por fase.
- Frecuencia.

Ilustración 53 Configuración datos de cables en Etap7.5.

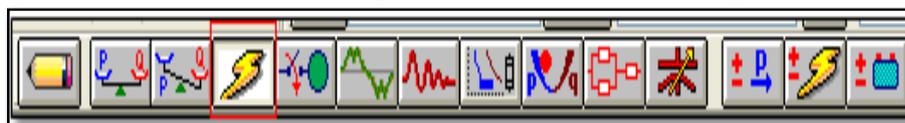
KERITE	Mag.				Size	
EPR	100%	5,0kV	3/C	CU	500	AWG/kcmil

Length	
Length	97 m
Tolerance	0 %
# Conductors / Phase	2

Fuente: Los autores, 2013.

Luego de ingresar los datos de los equipos antes mencionado en el editor de Etap 7.5, se procede a realizar el análisis de cortocircuito, lo cual es necesario configurar los parámetros necesarios en el icono denominado análisis de cortocircuito de la barra de herramienta del programa.

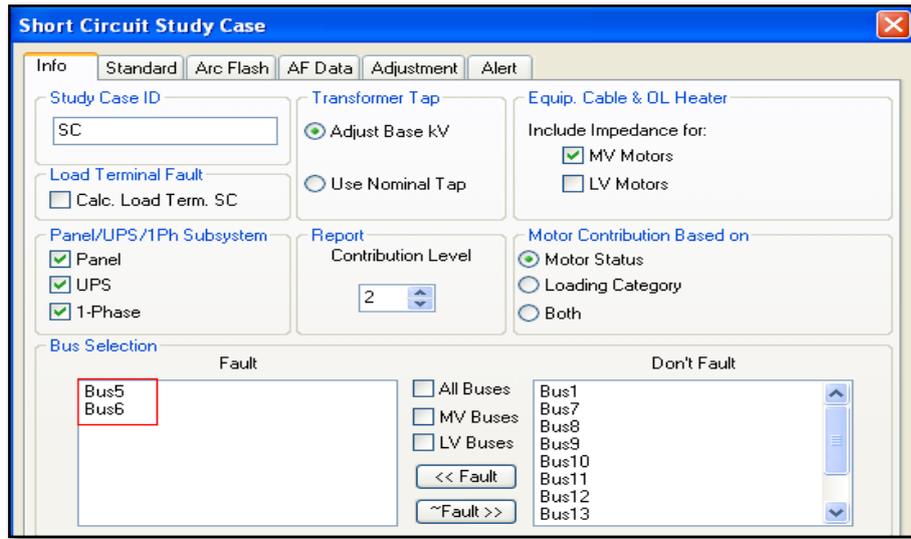
Ilustración 54 Configuración datos de cables en Etap7.5.



Fuente: Los autores, 2013.

En el icono de caso de estudio de cortocircuito de la barra de herramientas, se configura o se asigna la falla en el bus a analizar, en este caso se ajusta una falla de cortocircuito en el bus 5 que es el bus de la subestación del área del Molino de Bolas de Crudo y en el bus 6 que es un bus imaginario que comprende los terminales del motor síncrono del Molino de Crudo, que es el equipo que se pretende coordinar y ajustar las protecciones eléctricas con el nuevo relé de protección General Electric Modelo SR469.

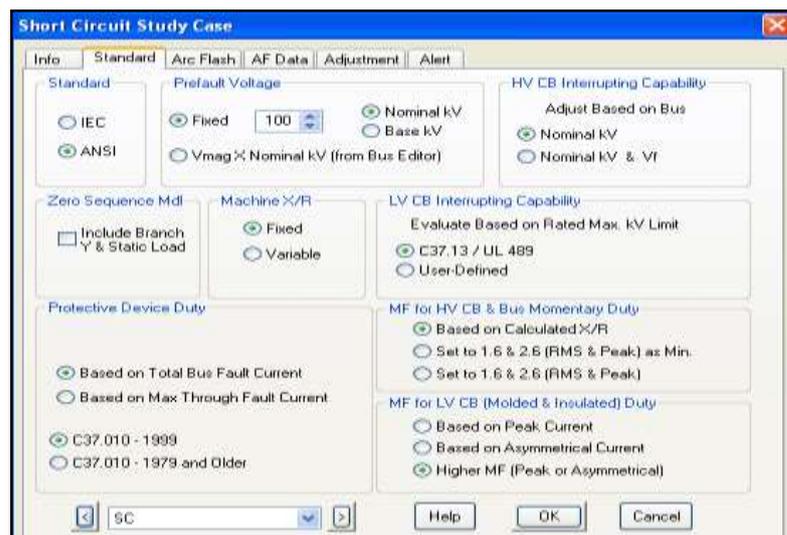
Ilustración 55 Ajuste de caso de estudio de cortocircuito en Etap 7.5.



Fuente: Los autores, 2013.

En el editor de caso de estudio de cortocircuito en la pestaña Estándar, nos proporciona dos estándares a elección del usuario, en este caso se selecciona el estándar ANSI para el cálculo de cortocircuito, donde permite ajustar el voltaje de pre falla, la relación X/R fijo o variable de las maquinas, el estándar del cálculo de cortocircuito por el estándar ANSI y la capacidad de interrupción para interruptores.

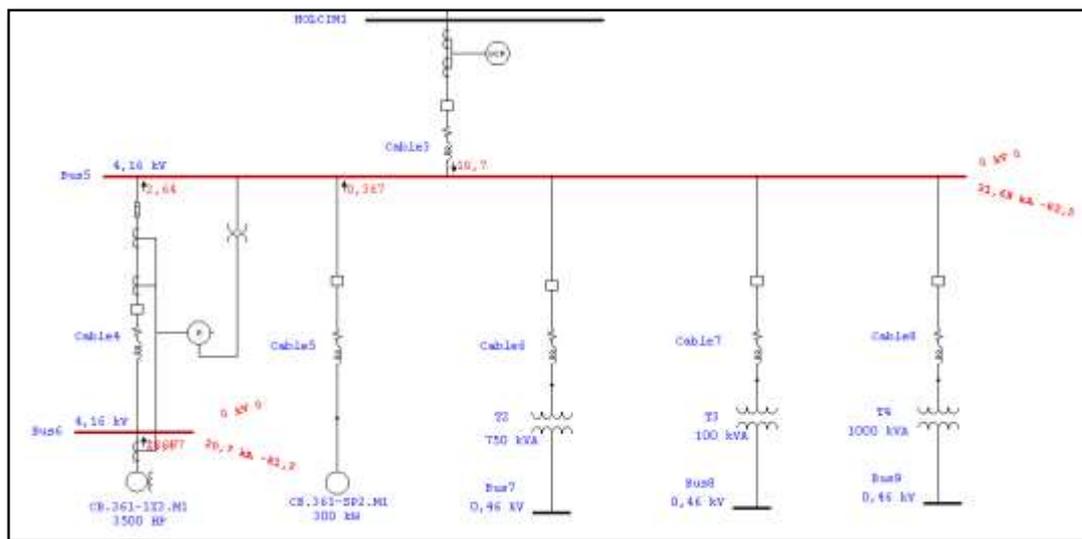
Ilustración 56 Ajuste de caso de estudio de cortocircuito en Etap 7.5.



Fuente: Los autores, 2013.

Después de ajustar el editor de caso de estudio de cortocircuito, se procede a generar con el programa, las diferentes fallas en las barras o buses antes configurados en el editor del programa, estas fallas son calculadas por la norma ANSI definidos por tiempo a medio ciclo (máxima corriente de cortocircuito), 1,5 a 4 ciclos, 30 ciclos (mínima corriente de cortocircuito). Las corrientes de fallas en los buses son mostradas en el diagrama eléctrico y muestran las contribuciones de corrientes generadas por equipos como motores síncronos. A continuación se detalla en la Ilustración la corriente de falla generada en el bus 6 del diagrama eléctrico que corresponde a los terminales del motor síncrono, estas diferentes corrientes de falla como por ejemplo la corriente a medio ciclo nos permite analizar si el interruptor o contactor del motor tiene la capacidad de soportar corrientes de cortocircuito momentáneas, las de 4 ciclos permitir abrir y despejar fallas durante este tiempo y asegurar una adecuada protección del motor en el relé General Electric SR469.

Ilustración 57 Resultado caso de estudio de cortocircuito en Etap 7.5.



Fuente: Los autores, 2013.

Es posible generar un reporte del análisis del caso de estudio en el programa Etap, este reporte detalla la corriente de falla monofásica, trifásica, red equivalente a medio ciclo, 4ciclos o 30 ciclos, impedancia de equipos, datos de buses, y un resumen de cortocircuito en los buses seleccionado en el editor de caso de estudio.

Ilustración 58 Informe general de cortocircuito en Etap 7.5.

Tensión pre falta = 4.160 kV
 = 100.00 % de los kV nominales de barra (4.160 kV)
 = 100.00 % de los kV base (4.160 kV)

Contribución		Falta Trifásica				Falta Línea-a-Tierra				Impedancias de Secuencia Positiva y Cero Observadas en "Barra Origen"					
Barra Origen ID	Barra Destino ID	% V Barra Origen	KA Sin. rms	% de Tensión en Barra Origen	Va	Vb	Vc	KA Sin. rms	Ia	Ib	Ic	R1	X1	R0	X0
Bus5	Total	0.00	26.074	0.00	89.34	121.13	21.796	21.796	5.670+000	5.290+000	4.871+000	7.870+000			
HQC0M1	Bus5	18.22	24.179	27.80	87.25	97.48	20.686	21.796	6.442+000	5.711+000	4.871+000	7.870+000			
Bus6	Bus5	0.34	1.762	0.34	88.60	115.26	1.187	0.000	2.150+000	7.870+000					
Bus10	Bus5	0.00	0.147	0.00	88.38	123.14	0.114	0.000	6.070+000	0.410+000					
Bus11	Bus5	0.00	0.000	0.00	88.38	123.13	0.000	0.000							
Bus12	Bus5	0.00	0.000	0.00	88.38	123.13	0.000	0.000							
Bus13	Bus5	0.00	0.000	0.00	88.38	123.13	0.000	0.000							
HQC0M1	HQC0M1	71.22	24.179	87.88	89.84	98.23	20.686	21.796 *	5.150+000	5.210+000	1.511+000	3.370+000			
CH30-1(11.3M)	Bus6	100.00	1.762	100.00	100.00	100.00	1.187	0.000	2.150+000	7.870+000					
CH30-2(2.3M)	Bus10	100.00	0.147	100.00	100.00	100.00	0.129	0.000	6.070+000	0.420+000					
Bus7	Bus11	0.00	0.000	71.89	36.81	94.89	0.000	0.000							
Bus8	Bus12	0.00	0.000	71.89	36.91	94.89	0.000	0.000							
Bus9	Bus13	0.00	0.000	71.89	36.81	94.89	0.000	0.000							

Fuente: Los autores, 2013.

Ilustración 59 Informe de cortocircuito a 4 ciclos en Etap 7.5.

Informe Resumen de Cortocircuito

1.54 ciclos - Corrientes de Falta Trifásica, LG, LL, y LLG

Tensión pre falta = 100 % de la Tensión Nominal de Barra

Barra ID	kV	Falta Trifásica			Falta Línea-a-Tierra			Falta Línea-a-Línea			*Línea-a-Línea-a-Tierra		
		Activa	Imag.	Mag.	Activa	Imag.	Mag.	Activa	Imag.	Mag.	Activa	Imag.	Mag.
Bus5	4.16	2.778	-25.928	26.074	6.457	-20.817	21.796	22.814	2.407	-23.640	-26.548	-3.667	27.342
Bus6	4.16	3.344	-24.268	24.498	6.775	-15.992	17.368	21.670	2.809	-21.665	-24.654	-2.562	24.787

Fuente: Los autores, 2013.

3.11 Análisis de coordinación del dispositivo.

El análisis de coordinación de protecciones en ETAP permite al usuario, ingeniero eléctrico, verificar la coordinación con otros sistemas de protecciones en el sistema eléctrico estudiado como son los sistemas de protección de respaldo.

El programa es integrado ya que ofrece una librería con los dispositivos de protecciones de diferentes marcas de proveedores, funciones inteligentes incorporadas en el programa proporcionan recomendaciones confiables respecto a los

elementos o equipos tomados bajo consideración, permitiendo verificar posibles problemas de diseño y tomar decisiones para mejorar la fiabilidad, aumentar la estabilidad del sistema.

En la barra de herramientas se puede seleccionar el icono para el análisis de coordinación de protecciones como se detalla en la figura a continuación.

Ilustración 60 Icono de coordinación de protección en Etap 7.5.



Fuente: Los autores, 2013.

Para el ajuste de protecciones se procedió a insertar fallas en los buses ajustados en el caso de estudio, estas fallas son generadas como fallas monofásicas y trifásicas y permite verificar la correcta coordinación del relé de protección del motor síncrono con el relé aguas arriba del sistema definido como un relé de respaldo para fallas en el motor síncrono del molino de bola de Crudo.

Ilustración 61 Barra de herramienta de coordinación de protección en Etap 7.5.

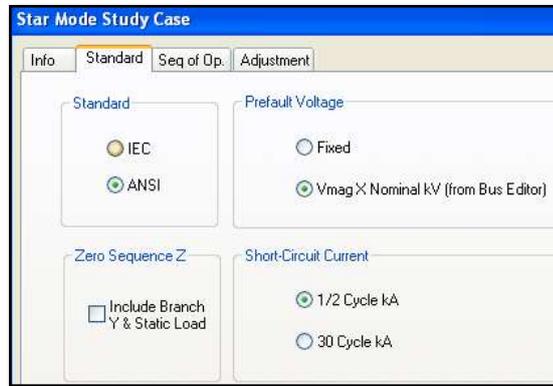


Fuente: Los autores, 2013.

El caso de estudio permite definir el estándar ajustado para el análisis de inserción de las fallas. Cuando se crea un nuevo caso de estudio, el estándar de cortocircuito se hace igual a la norma del proyecto que ha especificado en el cuadro de diálogo de las normas del Proyecto (en el menú Proyecto,).

Cuando se selecciona el estándar ANSI, aparecerá esta página, como se muestra a continuación.

Ilustración 62 Definición de Estándar de estudio en Etap 7.5.



Fuente: Los autores, 2013.

En la pantalla secuencia de operación se define el tipo de falla en los buses analizados, así también se define valores de fallas simétrica o asimétrica a ser considerado. En conclusión esta página contiene los parámetros para la realización del análisis de secuencia de operación del dispositivo de protección.

Ilustración 63 Secuencia de operación de fallas en Etap 7.5.



Fuente: Los autores, 2013.

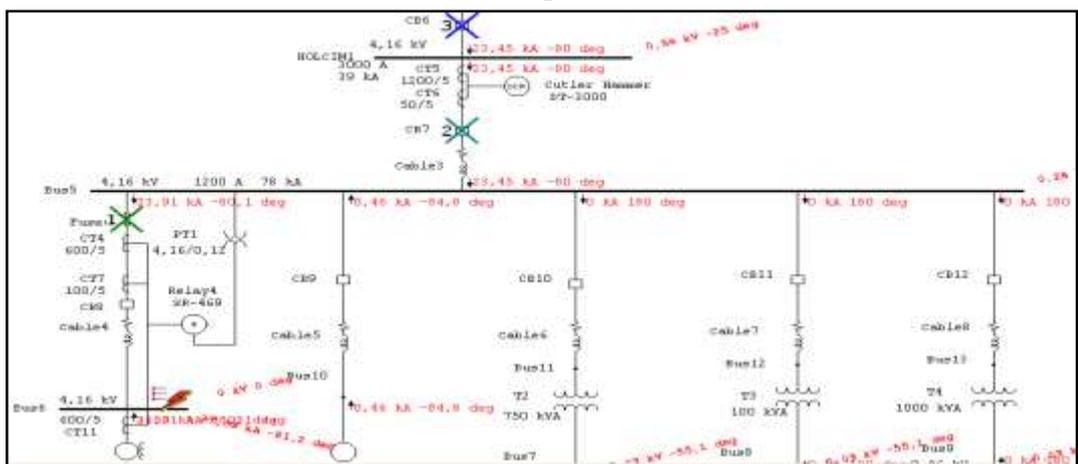
Con el programa ETAP, no sólo se puede trabajar con las curvas de tiempo-corriente, también se puede determinar el tiempo de funcionamiento de los dispositivos de protección, simplemente mediante la colocación de una falla en el diagrama unifilar. Las operaciones de la secuencia se calculan automáticamente y se enumeran en el

visor de sucesos, que está vinculada de forma dinámica con el diagrama unifilar. Este concepto de un solo paso utiliza el diagrama unifilar inteligente y lleva a cabo un conjunto completo de acciones para determinar el funcionamiento de todos los dispositivos de protección. Esto incluye el desplazamiento interno (normalización) de cada curva característica de tiempo actual basado en el nivel de la contribución individual de falla.

La secuencia de Operación proporciona una amplia solución del sistema para un tiempo de operación precisa y realista y el estado de los dispositivos de protección, tales como relés, fusibles, interruptor automático, dispositivos de disparo, contactor, etc. Se calcula el tiempo de funcionamiento de cada dispositivo de protección sobre la base de su configuración, característica de tiempo corriente, y enclavamientos para una específica ubicación y tipo de falla.

A continuación se muestra en la figura la inserción en una falla trifásica en los terminales del motor síncrono, y se puede visualizar las corrientes en los buses y la corriente de contribución del motor síncrono al sistema, además se visualiza también la secuencia de operación de los relés de protección del sistema ante una falla trifásica.

Ilustración 64 Corrientes de cortocircuito y Secuencia de operación de dispositivos del sistema en Etap 7.5.²¹



Fuente: Los autores, 2013.

²¹ Se puede visualizar en el anexo A la ilustración para su mayor entendimiento.

El reporte de secuencia de operación de los dispositivos de protección de los equipos como motores de inducción, síncronos, buses, que son los relés de protección ,su operación ante una falla son mostrado en un reporte proporcionado por el programa de simulación ETAP, la cual detalla el tiempo desde el inicio de la falla en orden secuencial, muestra la identificación del dispositivo de protección que vio la falla, así como la corriente de falla en kA ,esta corriente de falla es la que define el tiempo de operación del relé, siendo que algunos dispositivos de protección están ajustados como una característica inversa de tiempo-corriente, en donde mayor corriente en kA menos tiempo será el disparo del relé para despejar la falla.

Ilustración 65 Evento de secuencia de operación de los dispositivos en Etap 7.5.

Sequence-of-Operation Events - Output Report: FALLA_MONO_MOTOR					
3-Phase (Asymmetrical) Fault on bus: Bus6					
Data Rev.: Base		Config: Normal		Date: 01-12-2013	
Time (ms)	ID	If (kA)	T1 (ms)	T2 (ms)	Condition
10,0	Fuse6	23,906	< 10,0	< 10,0	
50,0	Cutler Ham...	23,448	50,0		Phase - OC1 - 50
133	CB7		83,3		Tripped by Cutler Hammer Phase - OC1 - 50
500	Relay9	23,448	500		Phase - OC1 - 50
583	CB6		83,3		Tripped by Relay9 Phase - OC1 - 50
1684	Relay10	1,414	1684		Phase - OC1 - 51
4163	Relay4	23,906	4163		Overload Phase - Thermal
4247	CB8		83,3		Tripped by Relay4 Overload Phase - Thermal
17000	Relay4	23,906	17000		Overload Acceleration - Accel
17083	CB8		83,3		Tripped by Relay4 Overload Acceleration - Accel

Fuente: Los autores, 2013.

Además el reporte generado detalla un resumen de cortocircuitos, mostrando los valores de impedancia de secuencias del sistema como detalla la siguiente figura.

Ilustración 66 Reporte de impedancias de secuencia en Etap 7.5.

Proyecto:	Ajuste de protección motor	ETAP	Página:	11
Ubicación:	Subestacion area Crudo 1	7.5.0	Fecha:	01-12-2013
Contrato:			SN:	12565678
Ingeniero:	Andrés Orellana - Franklin Yáñez	Caso de Estudio: XM	Resolución:	None
Archivo:	PROYECTO_TESIS		Config:	Normal

Informe Resumen de Cortocircuitos										
Barra	IV	Impedancia Sec. Positiva (ohm)			Imp. Secuencia Negativa (ohm)			Imp. de Secuencia Cero (ohm)		
		Resistencia	Reactiva	Impedancia	Resistencia	Reactiva	Impedancia	Resistencia	Reactiva	Impedancia
Bus0	0.100	0.02709	0.11470	0.11000	0.02742	0.11402	0.11014	0.14373	0.19909	0.24754

Fuente: Los autores, 2013.

3.12 Modificación del control de arrancador motor síncrono molino bolas de Crudo.

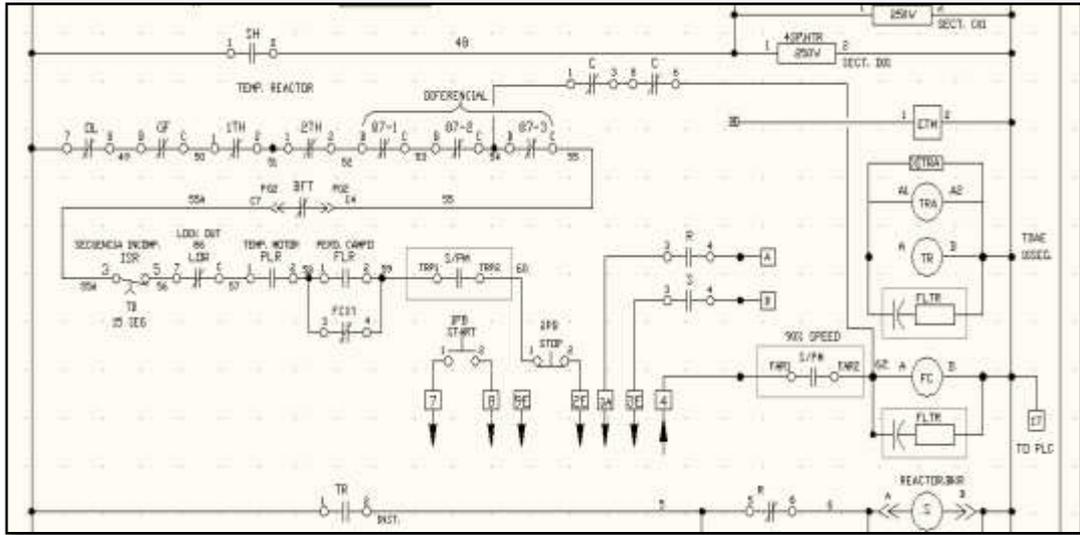
Previo al ajuste de protección del nuevo relé SR469 para el motor del molino, se modifica el control eléctrico de dicho motor, la idea principal es haber realizado un previo análisis de los elementos que conforma el circuito de control de paro del motor síncrono.

Los elementos a eliminar en el control de paro del motor se detallan a continuación:

- ISR Relé de secuencia incompleta.
- GF falla a tierra.
- 87-1 Diferencial de fase 1.
- 87-2 Diferencial de fase 2.
- 87-3 Diferencial de fase 3.
- LOR Relé de bloqueo (lockout relay).
- PLR Relé de pérdida de fase.
- 27 Relé de baja tensión.
- 81 Relé de frecuencia.

Estas protecciones se eliminan debido a que el SR469 obtiene todas estas funciones en el mismo equipo.

Ilustración 67 Control de start/stop del motor molino de bolas de Crudo.



Fuente: Holcim-Ecuador, 2013.

Es necesario indicar que protecciones como diferencial de fases (87) y de frecuencia (81) están deshabilitadas o puenteadas en el sistema de control de paro del equipo debido a razones desconocidas.

Además de la parte de control se eliminaron algunos elementos de medición obsoletos como la medición de temperatura del devanado del estator (Omega) y la medición de potencia del motor del molino de bolas (transductor de potencia).

3.13 Ajustes de protección del motor síncrono CB.361-1X3.

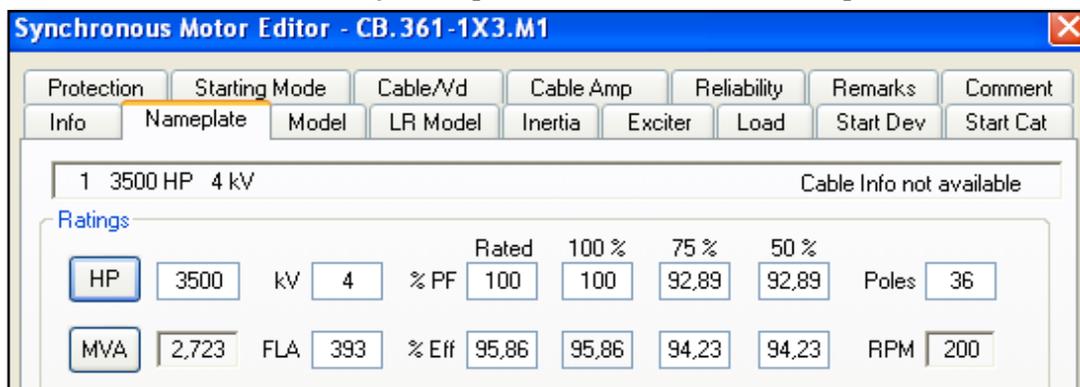
En esta sección detallaremos los ajustes de protecciones del relé de protección del motor síncrono del accionamiento del molino de bolas del área de Crudo de la empresa Holcim.

3.14 Ajuste de protecciones del relé General Electric SR469.

Para el ajuste de las protecciones del relé General Electric SR469, es necesario haber realizado un previo análisis de cortocircuito para determinar las corrientes máxima y mínima de cortocircuito del sistema, la cual sirve para el ajuste de protección del motor y definir la capacidad de interrupción del interruptor o contactor del motor.

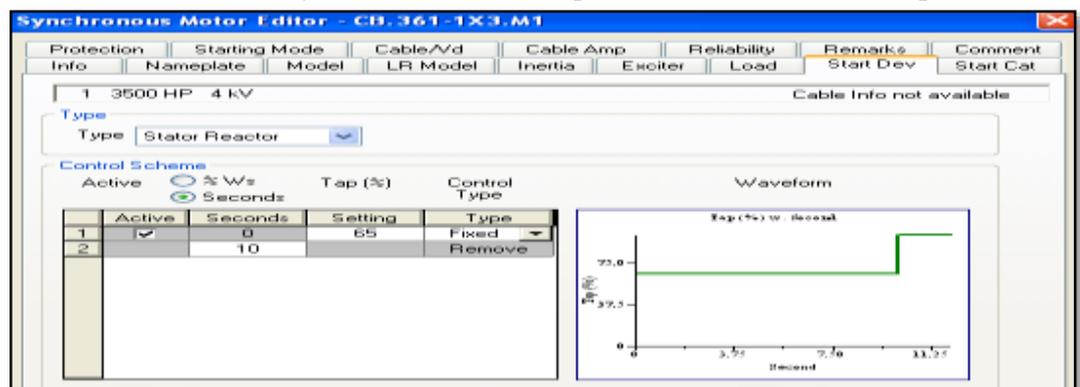
Ajustamos las características de placa nominal del motor síncrono, potencia, voltaje, amperaje, modo de arranque, dispositivo de arranque. En el caso del motor síncrono configuramos como modo de arranque a tensión reducida ya que el arranque del motor cuenta con un reactor ajustado al 65% de la tensión nominal del sistema. Cuando un motor arranca como tensión reducida el tiempo de aceleración del motor es mucho mayor en comparación al arranque directo (across the line), por eso es necesario tener en cuenta este parámetro en el momento de ajuste del parámetro de aceleración del relé de protección.

Ilustración 68 Ajuste de placa del motor síncrono en Etap 7.5.



Fuente: Los autores, 2013.

Ilustración 69 Ajuste de modo de arranque del motor síncrono en Etap 7.5.

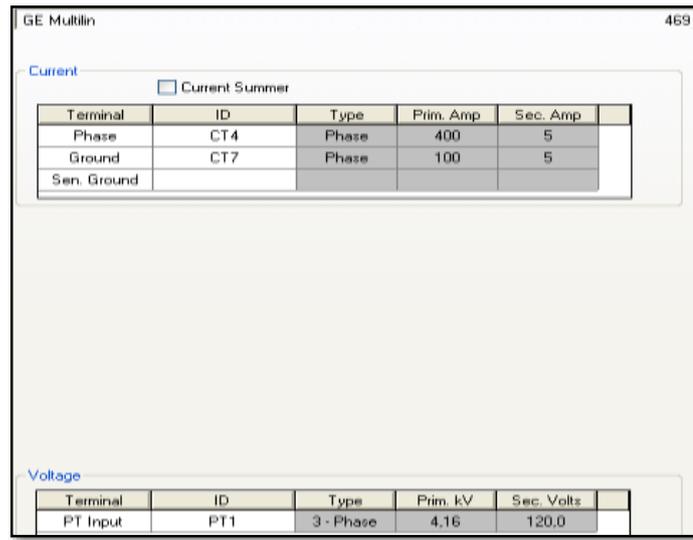


Fuente: Los autores, 2013.

Es necesario, al ajustar los parámetros eléctricos de protección del motor síncrono, referirse al estándar IEEE C37.96, que es una guía o resumen de experiencias en ajustes de protecciones eléctricas para motores eléctricos.

Definimos en el editor del programa ETAP, en la ventana del relé General Electric SR469 la relación de los parámetros de entradas de transformadores de corriente para fases, tierra y si es necesario las de corrientes diferenciales, así como también la relación de tensión de los transformadores de potencial, protecciones térmicas y de sobrecorrientes del motor.

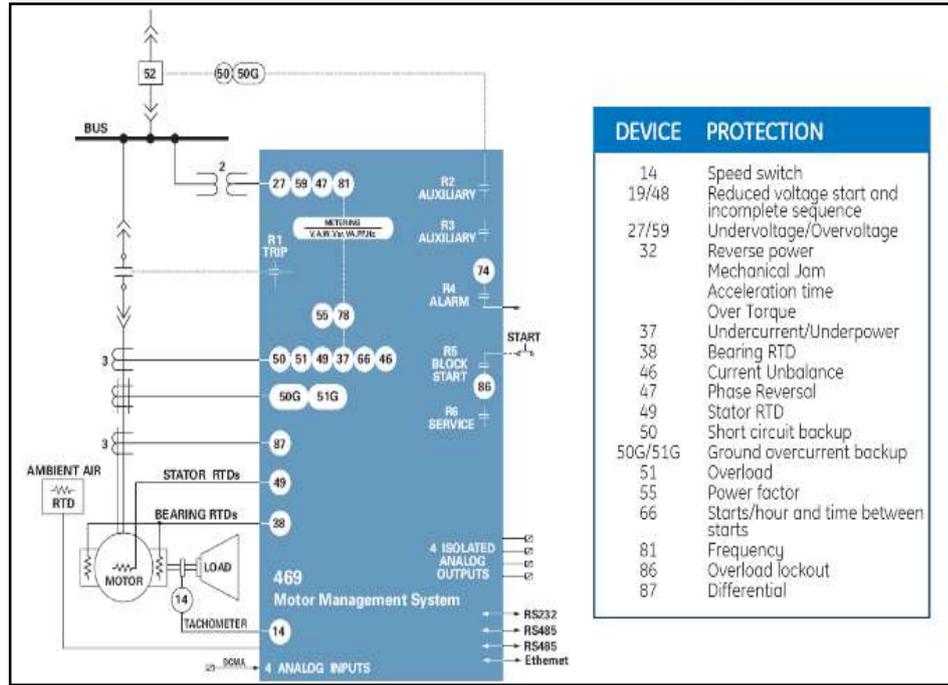
Ilustración 70 Ajuste de transformadores de corrientes en Etap 7.5.



Fuente: Los autores, 2013.

Los ajustes de protecciones del relé de protección General Electric SR469, se basaron en los requerimientos mínimos de protección para motores síncronos de media tensión referido por el estándar IEEE C37.96.2000 mencionado en el capítulo 2 de este libro.

Ilustración 71 Protecciones incluidas en relé General Electric SR469.



Fuente: Los autores, 2013.

A continuación se detalla los ajustes de protección programados en el relé definido por el número de dispositivo de la norma ANSI:

Tabla 15 Protecciones programadas en relé General Electric SR469.

DISPOSITIVO ANSI	PROTECCION
27	BAJO VOLTAJE
48	RELE DE SECUENCIA IMCOMPLETA
49	RELE TERMICO
51G	SOBRECORRIENTE DE TIERRA
59	SOBREVOLTAJE
50G	OC INSTANTANEA DE TIERRA.
81	FRECUENCIA
46	DESBALANCE DE CORRIENTE

Fuente: Los autores, 2013.

Los ajustes de parámetros del relé, fue realizado con la ayuda del programa EnerVista 469 de la compañía General Electric, este programa facilita la rápida configuración de los parámetros eléctricos asociados al relé y además permite una autoconfiguración guiada de los parámetros básicos como son los datos de placas del motor, elementos de entradas como transformadores de corriente, transformadores de potencial, permitiendo una interfaz muy amigable al ingeniero eléctrico.

Ilustración 72 Programación de relé SR469 en programa EnerVista para PC.



Fuente: Los autores, 2013.

3.15 Equipo de mediciones eléctricas Pdma MCEmax

MCEmax impulsado por MCEGold integra las pruebas, el diagnóstico, el control de inventario, la planificación y la contención de costos. El probador integral supervisa todas las zonas de fallas potenciales y permite la notificación inmediata de las condiciones alarmantes. La operación estática y dinámica única permite MCEmax para ser utilizado en todas las aplicaciones y motores independientemente de su tamaño, tipo o condición. Este medidor combina la precisión del análisis del circuito del motor con la comodidad de análisis de potencia del motor. El MCEmax es una completa herramienta de gestión de motores activos para las necesidades actuales del motor.

Ilustración 73 Equipo de medición Pdma MCEmax

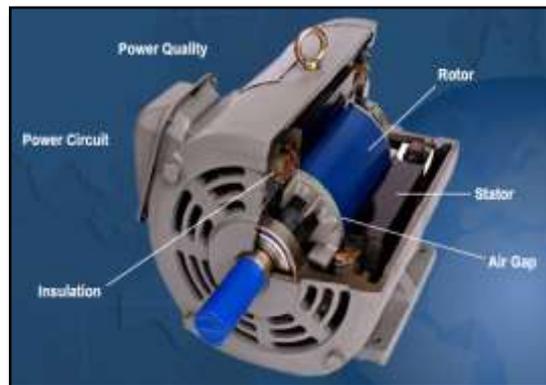


Fuente: www.pdma.com-2014

3.15.1 Zonas de Fallas

El probador integral examina las seis posibles zonas de fallas: estator, rotor, espacio de aire (entrehierro), calidad de la energía, circuito de potencia, y aislamiento. Cada zona de la falla del motor se clasifica después de cada prueba. Los códigos de color permiten una rápida identificación de problemas potenciales. Un análisis más detallado de los datos permite la definición de los problemas y el aislamiento de la causa raíz de cada fallo del motor potencial.

Ilustración 74 Partes de un motor, zonas de fallas.



Fuente: www.pdma.com-2014

3.15.2 Programa MCEGold

MCEGold utiliza la última tecnología para mejorar la comunicación entre el mantenimiento de plantas y la gestión empresarial. Este innovador software permite a la administración de acceso y ver los datos de pruebas e informes en su propio sistema.

MCEGold ofrece opciones fáciles de usar que permiten a los administradores crear "listas de vigilancia" y ver todos los motores y sus condiciones de forma instantánea. Presentación de informes es más fácil que nunca gracias a la creación automática y fácilmente de los informes, el centro de mensajes permite la comunicación directa entre los técnicos y la gestión.

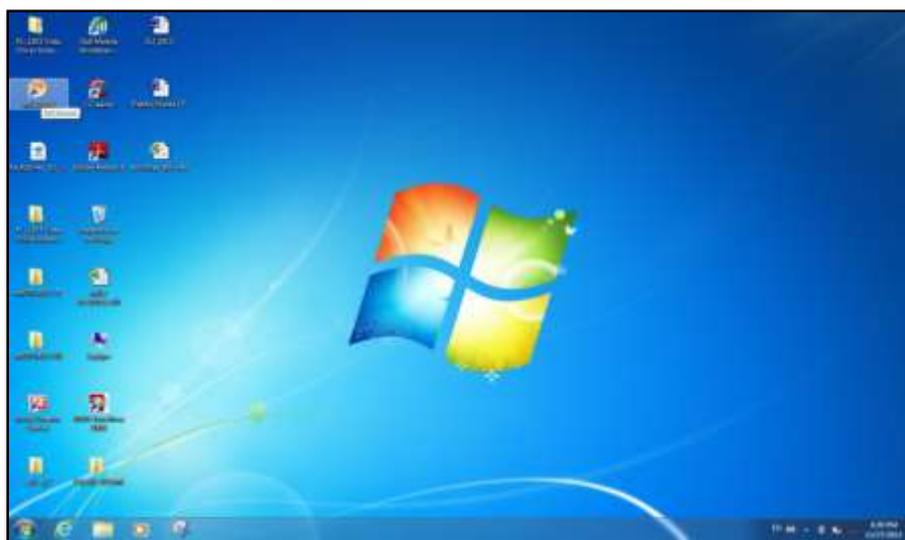
El estado de los motores activos críticos se puede actualizar mientras se comunica la información en su totalidad. MCEGold permite la comunicación con varias bases de datos que utilizan MSDE y servidores SQL. El software también puede convertir los datos a formato XML, una tecnología independiente de la plataforma, y puede exportar e integrar aplicaciones de tercera parte o crear documentos PDF. MCEGold agiliza la comunicación dentro de una organización, ya sea a partir de una planta a otra o de una persona a otra.

3.15.3 Procedimiento para obtener la curva de arranque del motor síncrono.

Para obtener la curva de arranque del motor síncrono del Molino Crudo de Bolas, necesitamos utilizar el equipo Pdma MCEmax donde por medio del programa MCE Gold realizaremos el procedimiento adecuado.

Como primer paso se requiere encender la laptop y en el escritorio dar doble clic en el icono de MCEGold.

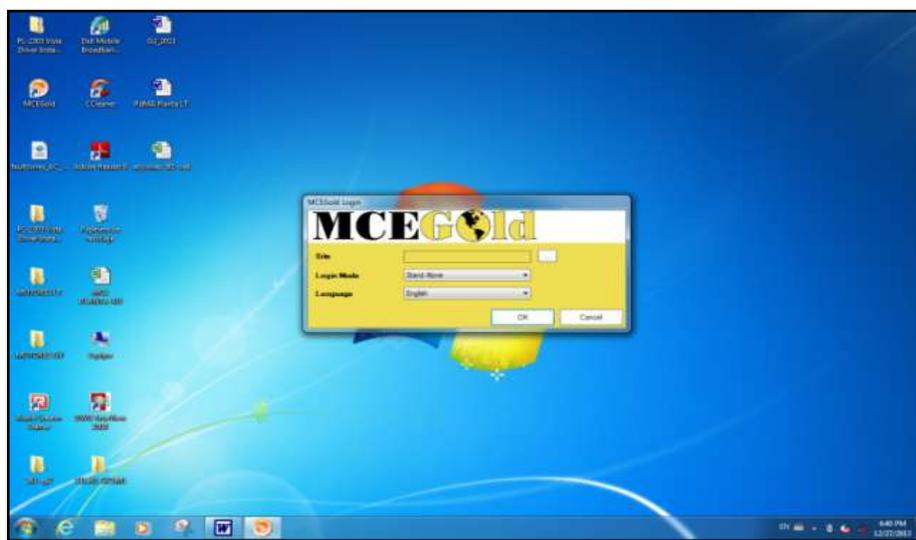
Ilustración 75 Icono MCEGold en el escritorio



Fuente: Los autores, 2013.

Aparecerá una ventana donde hay que elegir la base de datos.

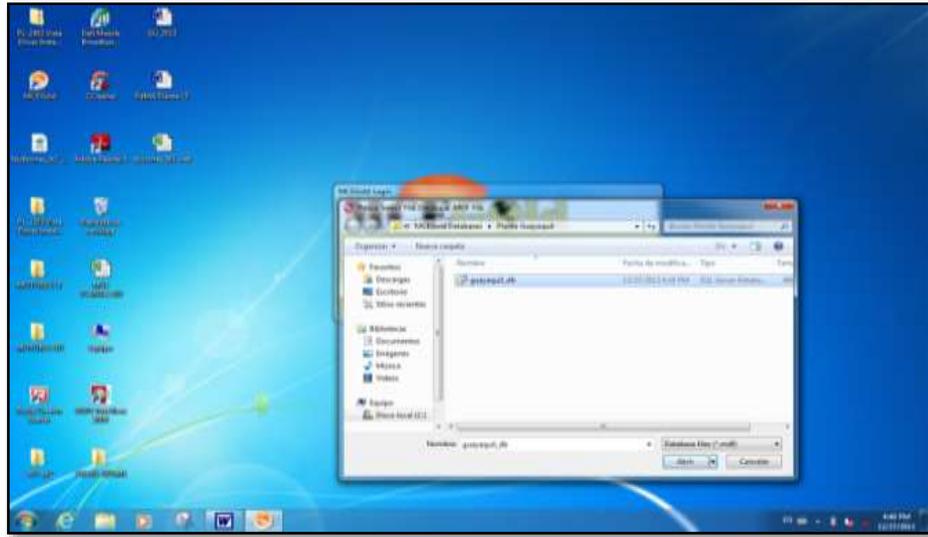
Ilustración 76 Ventana de la base de datos.



Fuente: Los autores, 2013.

Examinar y escoger la opción Guayaquil.db que es la base de datos de la planta.

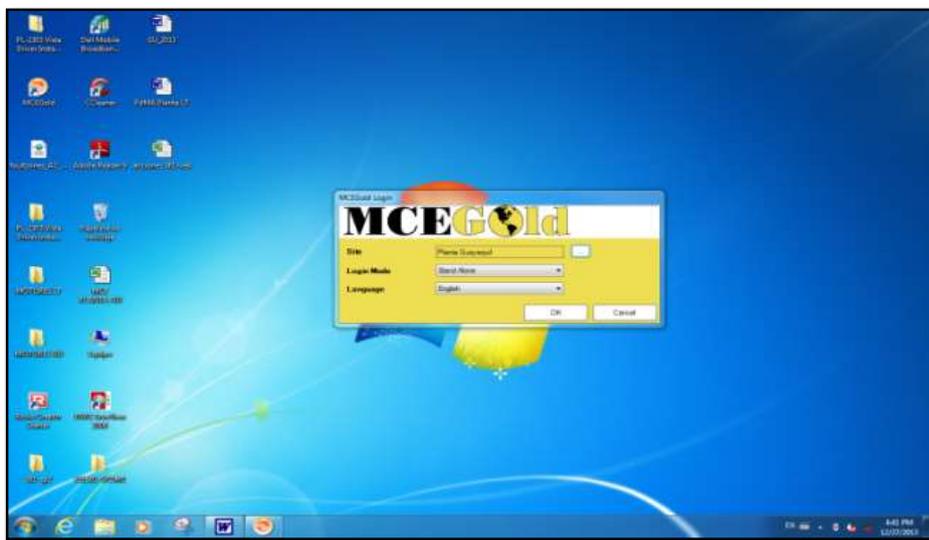
Ilustración 77 Elección de la base de datos



Fuente: Los autores, 2013.

Luego de eso se carga en la ventana y poner “ok”.

Ilustración 78 Aceptación de la base de datos



Fuente: Los autores, 2013.

Se abrirá el programa apareciendo esta pantalla.

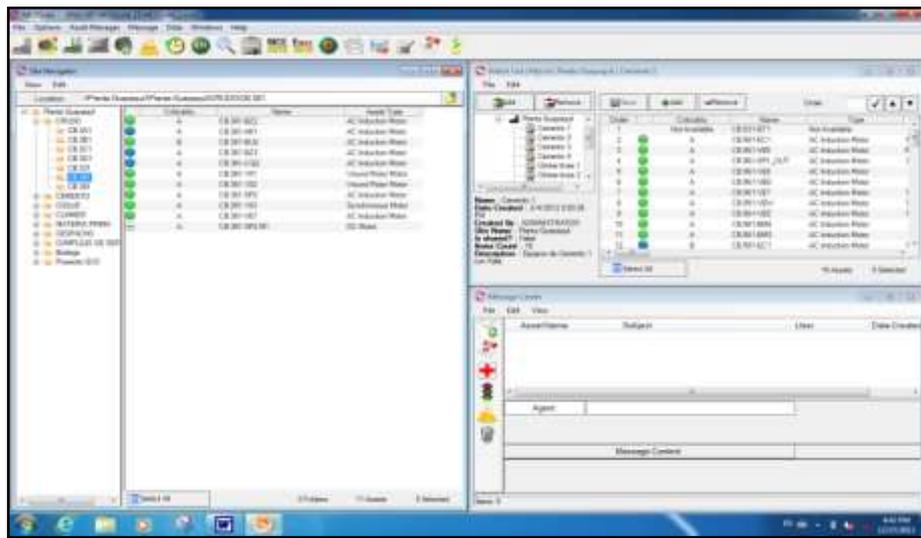
Ilustración 79 Ventana principal del programa MCEGold



Fuente: Los autores, 2013.

Del lado izquierdo explorar donde dice planta Guayaquil seguir abriendo la carpeta CRUDO y elegir el equipo CB.361-1X3.

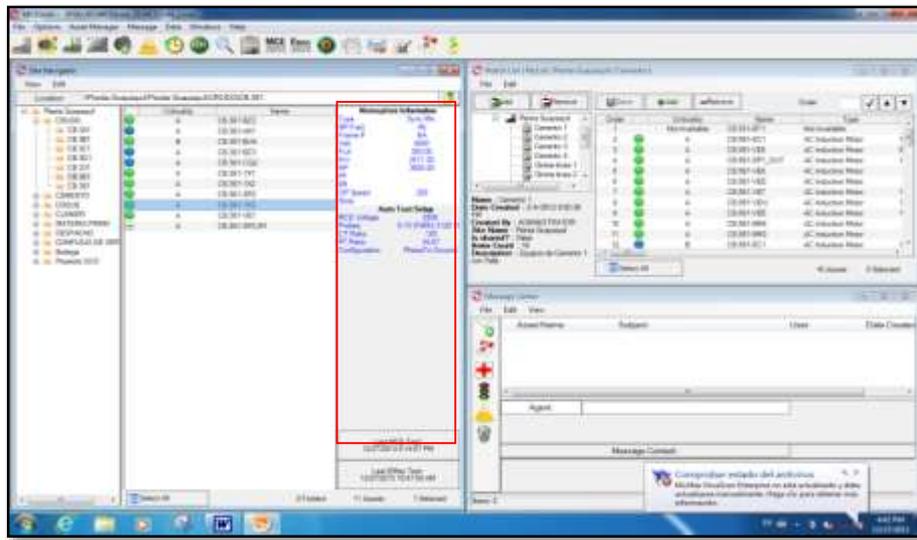
Ilustración 80 Exploración en el árbol de equipos



Fuente: Los autores, 2013.

Se desplegará en el centro de la pantalla los datos del motor.

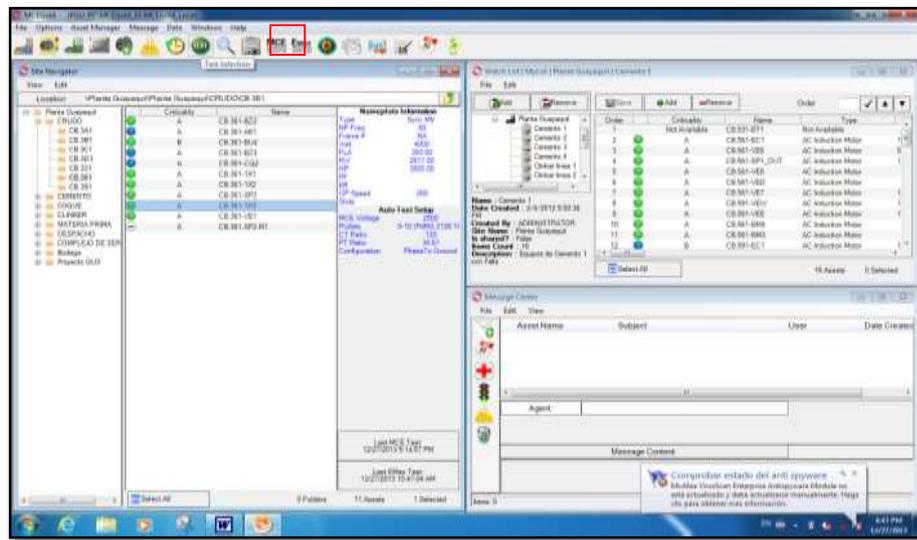
Ilustración 81 Datos de placa del motor



Fuente: Los autores, 2013.

En la barra de herramientas del programa elegir el botón TEST de color verde.

Ilustración 82 Icono de elección de pruebas “Test”

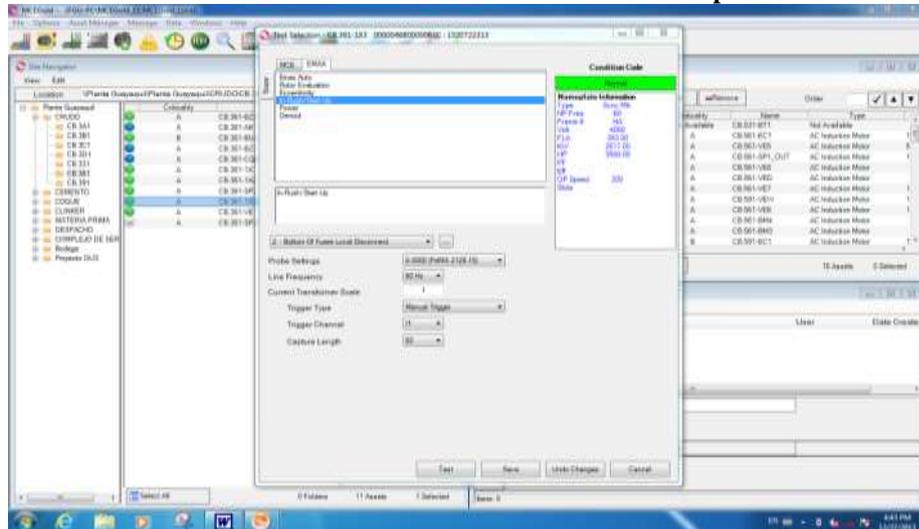


Fuente: Los autores, 2013.

Aparecerá una nueva ventana donde se debe elegir el tipo de prueba a realizar en este caso es una prueba dinámica Emax y elegir la prueba de Inrush/start-up que es la

prueba de arranque. Luego se escoge los tipos de instrumentos de medición que se utilizara en nuestro caso un toroide de capacidad para 3000A, y luego presionar Test.

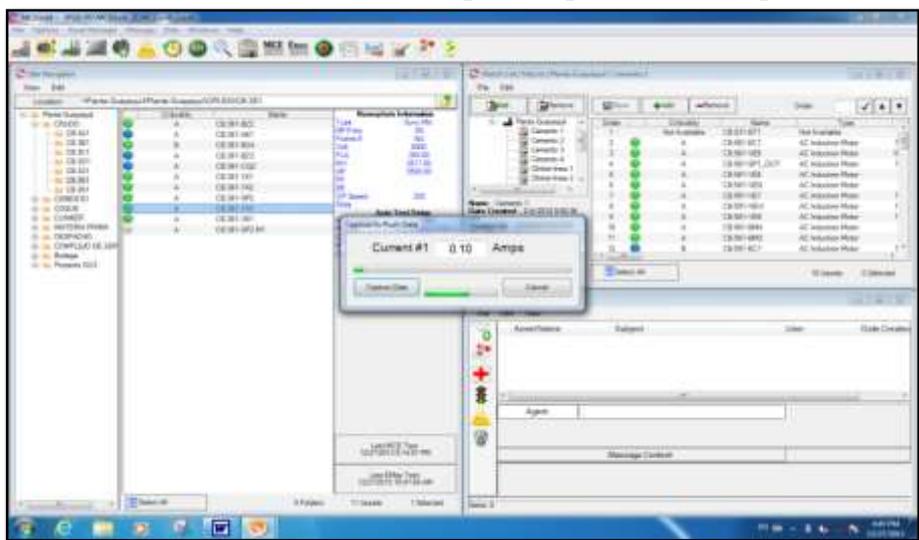
Ilustración 83 Ventana de selección de las distintas pruebas



Fuente: Los autores, 2013.

Aparece la ventana para realizar la prueba de arranque, una vez que se da capture data inmediatamente se deberá arrancar el equipo y esperar hasta que se termine de obtener todos los datos del arranque, en nuestro caso se puso una prueba de 60 segundos.

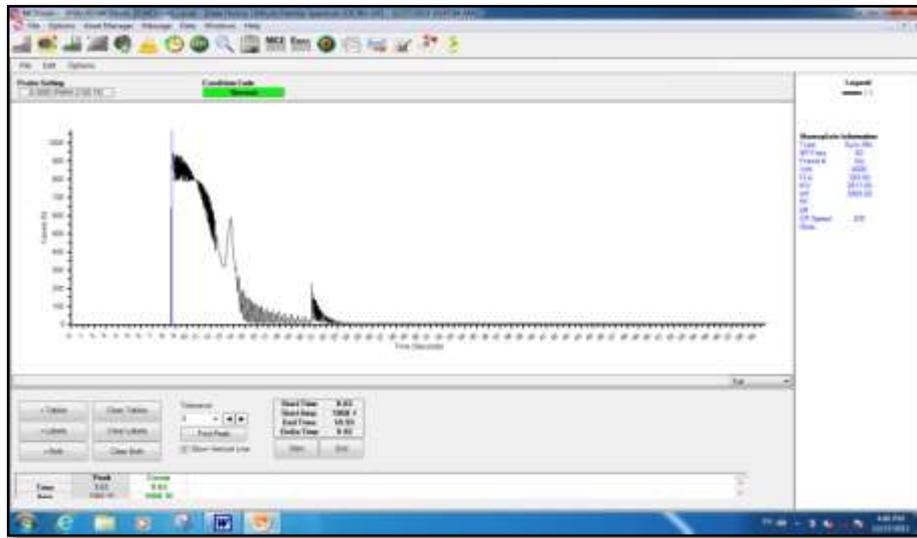
Ilustración 84 Ventana de capture de prueba de arranque.



Fuente: Los autores, 2013.

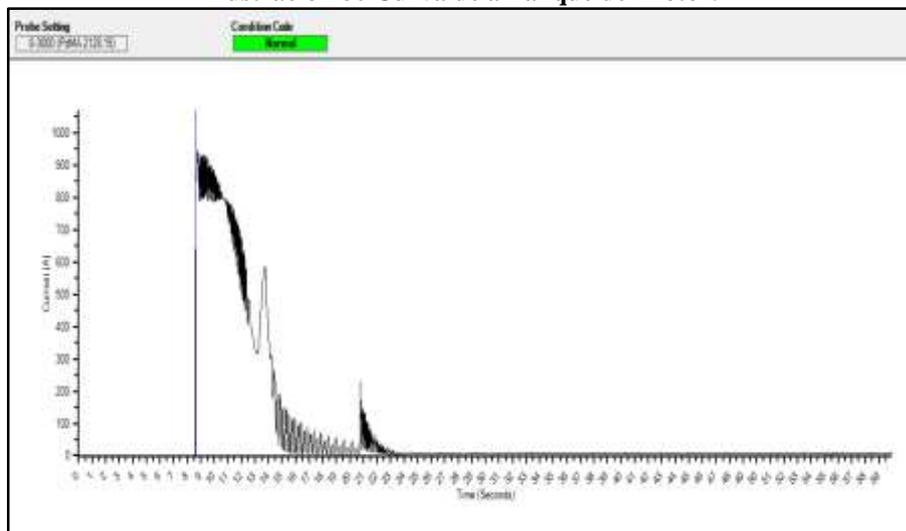
Una vez terminada la captura de datos aparecerá la pantalla con la curva de arranque obtenida.

Ilustración 85 Resultado de la prueba de arranque del motor síncrono.



Fuente: Los autores, 2013.

Ilustración 86 Curva de arranque del motor.



Fuente: Los autores, 2013.

3.16 Unidad de pruebas Universal de Relés Omicron CMC 356

La unidad CMC 356 es la solución universal para probar todas las generaciones y tipos de relés de protección. Sus seis potentes fuentes de corriente (modo trifásico: hasta 64 A / 860 VA por canal) con una gran gama dinámica, hacen que la unidad sea capaz de probar hasta los relés electromecánicos de alta carga con demanda de potencia muy alta.

La unidad CMC 356 es la opción ideal para aplicaciones que requieren la más alta versatilidad, amplitud y potencia. Los ingenieros de puesta en servicio agradecen especialmente su capacidad de realizar comprobaciones de cableado y plausibilidad de los transformadores de corriente, mediante la inyección primaria de altas corrientes desde la unidad de prueba.

3.16.1 Características principales

- Fuentes de corriente muy potentes para prueba incluso de relés electromecánicos de alta carga.
- Altas amplitudes de corriente para prueba de relés de 5 A.
- Alta precisión y versatilidad para pruebas de relés estáticos y numéricos de todos los tipos
- Red integrada para prueba de dispositivos IED IEC 61850.
- Funcionalidad de medida analógica de 10 canales y registro de transitorios (opción).

Ilustración 87 Omicron CMC 356



Fuente: www.omicron.at-2014.

3.16.2 Programa Test Universe.

Es el software con el cual se controla el equipo de pruebas Omicron CMC 356. La funcionalidad de Omicron test Universe incluye:

- Cómodas pruebas manuales controladas desde un pc.
- Pruebas con módulos de software optimizados para funciones específicas del equipo en prueba.
- Pruebas genéricas con la posibilidad de crear pruebas para requisitos especiales.
- Combinación de módulos en plantillas de prueba para pruebas.
- Generación automática de informes.
- Uso de plantillas de prueba predefinidas facilitadas por Omicron (biblioteca de pruebas de protección – PTL).
- Interfaz de programación CM Engine.
- Interfaz del usuario en 14 idiomas, que pueden cambiarse fácilmente.

Ilustración 88 Software Test Universe.



Fuente: www.omicron.at-2014

3.17 Procedimiento para simulación de fallas del relé de protección de motores GE 469.

Para esta prueba necesitamos tener los siguientes equipos:

- Relé de protección de motores GE 469.
- Unidad de pruebas universal de Relés Omicron CMC 356.
- Laptop con software test universe.

Imagen 8 Omicron CMC 356 a utilizarse.



Fuente: Los autores, 2014.

Para empezar las simulaciones es necesario hacer las conexiones al relé de protección, para lo cual nos guiamos en el manual del relé SR469 para conectar todas las señales en los terminales adecuados.

Imagen 9 Conexión de terminales en el relé de protección.



Fuente: Los autores, 2014.

Todas las conexiones fueron supervisadas por el tutor de la tesis antes de empezar las simulaciones.

Imagen 10 Revisión de ajustes de simulación en el manual del relé.



Fuente: Los autores, 2014.

Se realizó conexión del relé de protecciones a través del puerto RS232 con la laptop para cargar parámetros y ver valores en línea.

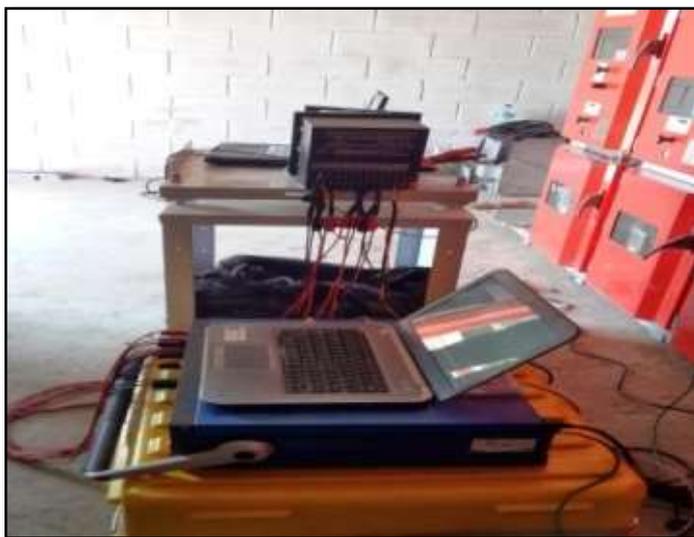
Imagen 11 Interfaz relé/software.



Fuente: Los autores, 2014.

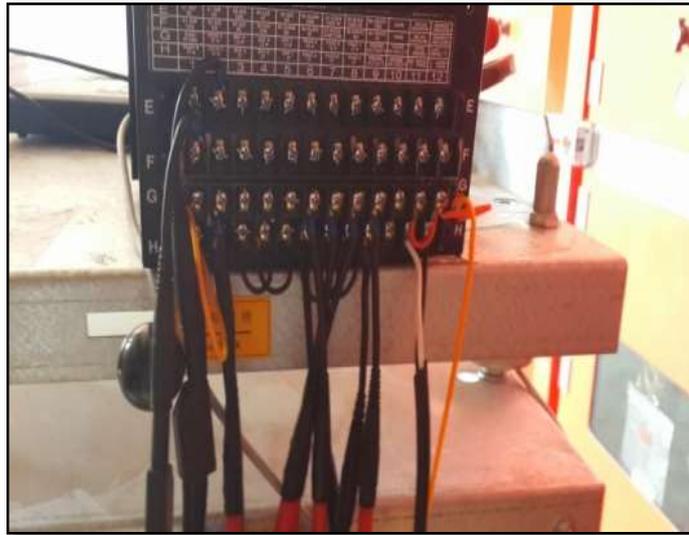
Una vez conectados todos los elementos necesarios para la simulación de las diferentes fallas, estamos listos para efectuar las pruebas.

Imagen 12 Conexión de interconexión relé SR469- Omicron CMC 356 finalizada.



Fuente: Los autores, 2014.

Imagen 13 Conexión de terminales en relé de protección para prueba de inyección de corriente.



Fuente: Los autores, 2014.

Luego procedemos a abrir programa Test Universe en la computadora que está conectada al Omicron CMC356.

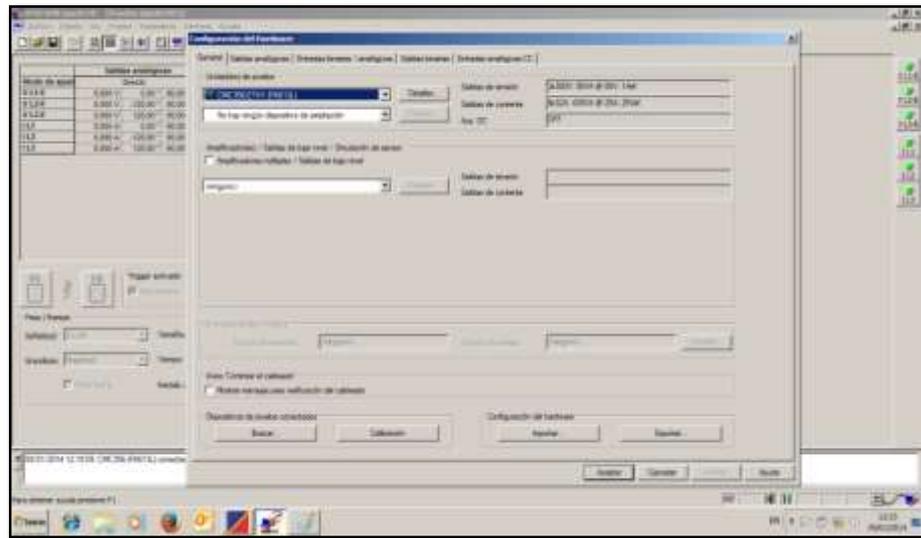
Ilustración 89 Programa Test Universe.



Fuente: Los autores, 2014.

Se configura el modelo de la unidad de pruebas de relés que se va a utilizar.

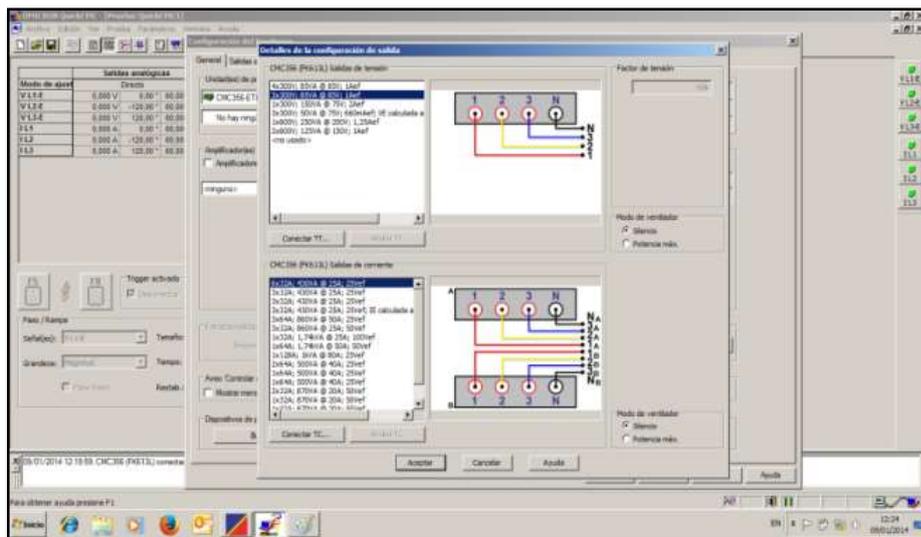
Ilustración 90 Configuración de hardware.



Fuente: Los autores, 2014.

Luego se realiza la configuración de las salidas de voltajes y corrientes que se van a necesitar para las pruebas.

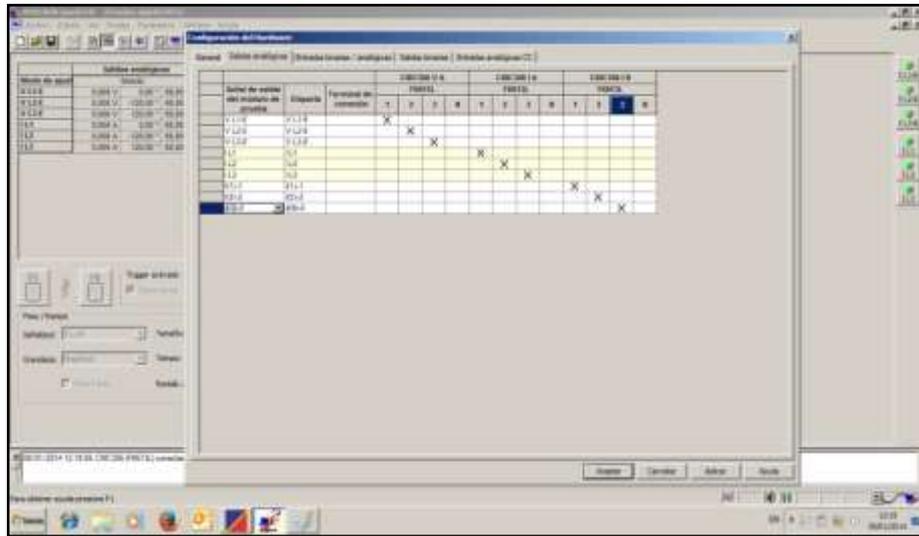
Ilustración 91 Configuración de las señales de voltajes y corrientes.



Fuente: Los autores, 2014.

Siguiendo con la configuración, debemos seleccionar todas las señales de voltajes y corrientes necesarias, como son los voltajes línea-neutro, las corrientes de las tres fases para la prueba de sobrecorriente y las corrientes para falla a tierra.

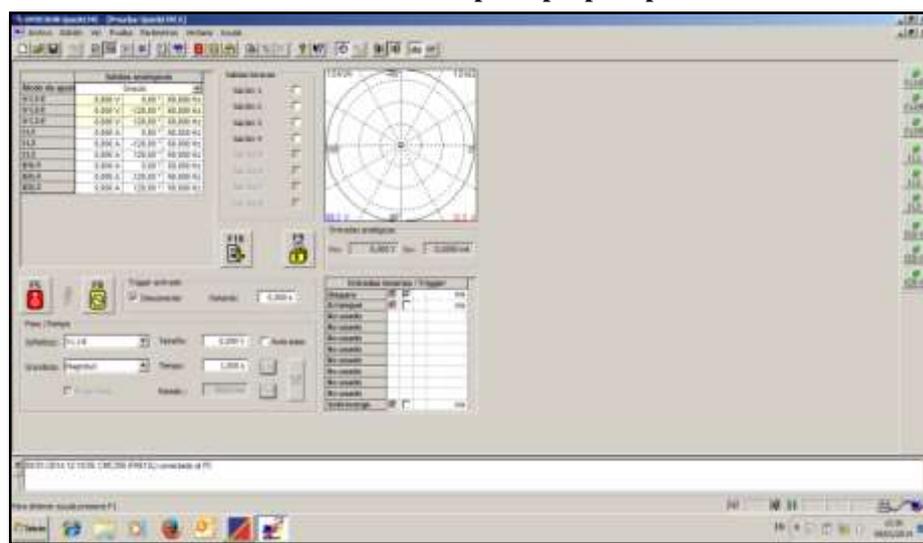
Ilustración 92 Configuración de salidas analógicas.



Fuente: Los autores, 2014.

Terminadas las configuraciones nos envía a la pantalla principal de las pruebas donde ingresaremos los niveles de voltajes y corrientes.

Ilustración 93 Pantalla principal para pruebas.



Fuente: Los autores, 2014.



CAPITULO IV

CAPITULO IV

4 ANÁLISIS Y RESULTADOS.

4.1 Introducción.

Para el desarrollo del capítulo 4, se analizarán varios resultados obtenidos por el estudio de cortocircuito del sistema eléctrico de la planta Holcim, la gráfica de la curva de arranque del motor síncrono, los ajustes del relé de protección General Electric SR469, siguiendo de una revisión de disparos de las diferentes protecciones del relé, inyectando corrientes que simulen fallas de cortocircuito, y, además se verifica la coordinación de protección con el relé aguas arriba del motor síncrono, ubicado en la subestación principal de Holcim.

4.2 Análisis obtenidos del informe de cortocircuito.

En los datos obtenidos en el informe de cortocircuito obtenido por el programa ETAP 7.5, se consideró un análisis por separado de todas las fuentes que alimentan el sistema eléctrico de la planta Holcim.

El motivo de considerar todas las fuentes de alimentación y no solo la fuente que se usa como fuente principal de la planta, se debe al hecho de verificar la máxima corriente simétrica en el sistema (falla trifásica), ya que estas corrientes son las más elevadas en una falla, y así poder verificar o recomendar la capacidad de interrupción de los interruptores de potencia o fusibles en el punto analizado.

Las mínimas corrientes de cortocircuito también se calculan porque son indispensables para elegir la curva de disparos de interruptores, fusibles y así ajustar las protecciones adecuadamente.

4.2.1 Resultados de análisis de cortocircuito de red eléctrica Holcim.

A continuación se detalla el resultado del análisis computacional por el programa ETAP 7.5 de las corrientes de cortocircuito mínima y máxima para las diferentes fuentes de alimentación del sistema eléctrico Holcim, en estado de mínima y máxima generación eléctrica.

Ilustración 94 Análisis de cortocircuito Electroquil Máxima Generación ½ Ciclo.

Proyecto:	ETAP	Página:	11
Ubicación:	7.5.0	Fecha:	20-07-2013
Contrato:		SN:	12345678
Región:	Caso de Estudio - SC	Revisión:	Base
Archivo:	PROYECTO_TESIS	Config:	Normal

Informe Resumen de Cortocircuito

1/2 Ciclo - Corrientes de Falta Trifásica, LG, LL y LLL

Tensión por Falta = 100 % de la Tensión Nominal de Barra

Barra	ID	kV	Falta Trifásica			Falta Línea-a-Tierra			Falta Línea-a-Línea			*Línea-a-Línea-a-Tierra		
			Activa	Imag	Mag	Activa	Imag	Mag	Activa	Imag	Mag	Activa	Imag	Mag
Bar1		4.16	3.009	-32.231	32.476	7.614	-22.789	24.063	27.814	3.421	28.023	-31.001	3.011	32.201
Bar6		4.16	4.729	-28.743	30.115	7.849	-17.015	18.725	25.789	4.094	26.077	-29.246	1.399	28.209

Fuente: Los autores, 2013.

Ilustración 95 Análisis de cortocircuito Electroquil Máxima Generación 4 Ciclos.

Proyecto:	ETAP	Página:	11
Ubicación:	7.5.0	Fecha:	20-07-2013
Contrato:		SN:	12345678
Región:	Caso de Estudio - SC	Revisión:	Base
Archivo:	PROYECTO_TESIS	Config:	Normal

Informe Resumen de Cortocircuito

1,5-4 ciclos - Corrientes de Falta Trifásica, LG, LL, y LLL

Tensión por Falta = 100 % de la Tensión Nominal de Barra

Barra	ID	kV	Falta Trifásica			Falta Línea-a-Tierra			Falta Línea-a-Línea			*Línea-a-Línea-a-Tierra		
			Activa	Imag	Mag	Activa	Imag	Mag	Activa	Imag	Mag	Activa	Imag	Mag
Bar1		4.16	3.942	-31.137	31.369	7.729	-22.541	23.877	27.429	3.416	27.681	-30.336	4.003	31.724
Bar6		4.16	4.667	-28.874	29.091	7.763	-16.893	18.243	23.264	4.064	25.006	-28.644	1.510	28.004

Fuente: Los autores, 2013.

Ilustración 96 Análisis de cortocircuito Electroquil Máxima Generación 30 Ciclos.

Proyecto:	ETAP		Página:	11
Ubicación:	7.5.0		Fecha:	20-07-2013
Contrato:			SN:	12345678
Ingeniero:	Caso de Estudio: SC		Revisión:	Base
Archivo:	PROYECTO_TESIS		Config.:	Normal

Informe Resumen de Cortocircuito

Corriente de Falta en Estado Estable (30 ciclos) - Trifásica, LG, LL y LLG

Tensión por Falta = 100 % de la Tensión Nominal de Barra

Barra		Falta Trifásica			Falta Línea-a-Tierra			Falta Línea-a-Línea			*Línea-a-Línea-a-Tierra		
ID	kV	Activa	Imag.	Mg.	Activa	Imag.	Mg.	Activa	Imag.	Mg.	Activa	Imag.	Mg.
Bus1	4.16	3.876	-29.128	29.445	1.316	-21.729	22.953	25.313	1.136	25.513	-28.203	4.947	28.708
Bus2	4.16	4.798	-28.780	27.173	1.408	-36.328	37.830	23.105	3.882	23.532	-26.908	1.790	28.648

Fuente: Los autores, 2013.

Ilustración 97 Análisis de cortocircuito Electroquil Mínima Generación 1/2 Ciclo.

Proyecto:	ETAP		Página:	11
Ubicación:	7.5.0		Fecha:	20-07-2013
Contrato:			SN:	12345678
Ingeniero:	Caso de Estudio: SC		Revisión:	Base
Archivo:	PROYECTO_TESIS		Config.:	Normal

Informe Resumen de Cortocircuito

1/2 Ciclo - Corrientes de Falta Trifásica, LG, LL y LLG

Tensión por Falta = 100 % de la Tensión Nominal de Barra

Barra		Falta Trifásica			Falta Línea-a-Tierra			Falta Línea-a-Línea			*Línea-a-Línea-a-Tierra		
ID	kV	Activa	Imag.	Mg.	Activa	Imag.	Mg.	Activa	Imag.	Mg.	Activa	Imag.	Mg.
Bus1	4.16	3.998	-29.262	29.535	7.309	-23.738	22.945	26.343	3.421	26.373	-29.328	4.878	29.738
Bus2	4.16	4.937	-27.235	27.390	7.446	-46.431	33.033	23.370	3.397	23.488	-30.690	1.689	27.043

Fuente: Los autores, 2013.

Ilustración 98 Análisis de cortocircuito Electroquil Mínima Generación 4 Ciclos.

Proyecto:	ETAP			Página:	11
Ubicación:	7.2.0			Fecha:	20-07-2013
Contrato:				SN:	12345678
Región:	Caso de Estudio: SC			Revisión:	Base
Archivo:	PROYECTO_TESIS			Config:	Normal

Informe Resumen de Cortocircuito

1,54 ciclos - Corrientes de Falta Trifásica, L-G, LL, y LLG

Tensión por Falta = 100 % de la Tensión Nominal de Barra

Barra	ID	kV	Falta Trifásica			Falta Línea-a-Tierra			Falta Línea-a-Línea			*Línea-a-Línea-a-Tierra		
			Activa	Imag	Mag	Activa	Imag	Mag	Activa	Imag	Mag	Activa	Imag	Mag
Bar0		4.16	3.040	-28.108	28.443	7.282	-21.579	22.718	24.057	3.418	25.898	-26.666	4.722	24.057
Bar6		4.16	4.485	-36.142	35.524	7.365	-16.554	17.089	23.982	3.887	23.417	-26.376	1.891	26.424

Fuente: Los autores, 2013.

Ilustración 99 Análisis de cortocircuito Electroquil Mínima Generación 30 Ciclos.

Proyecto:	ETAP			Página:	11
Ubicación:	7.2.0			Fecha:	20-07-2013
Contrato:				SN:	12345678
Región:	Caso de Estudio: SC			Revisión:	Base
Archivo:	PROYECTO_TESIS			Config:	Normal

Informe Resumen de Cortocircuito

Corrientes de Falta en Estado Estable (30 ciclos) - Trifásica, L-G, LL, y LLG

Tensión por Falta = 100 % de la Tensión Nominal de Barra

Barra	ID	kV	Falta Trifásica			Falta Línea-a-Tierra			Falta Línea-a-Línea			*Línea-a-Línea-a-Tierra		
			Activa	Imag	Mag	Activa	Imag	Mag	Activa	Imag	Mag	Activa	Imag	Mag
Bar0		4.16	3.877	-28.204	28.549	6.881	-20.556	21.678	22.342	3.338	22.489	-26.594	4.754	21.818
Bar6		4.16	4.417	-24.247	24.646	6.992	-15.671	17.080	20.899	3.825	21.344	-24.326	1.681	24.384

Fuente: Los autores, 2013.

Ilustración 100 Análisis de cortocircuito Salitral Máxima Generación ½ Ciclo.

Proyecto:	ETAP	Página:	11
Ubicación:	7.5.9	Fecha:	20-07-2013
Contrato:		SN:	12345678
Ingeniero:		Revisión:	Base
Archivo:	PROYECTO_TESD	Caso de Estudio:	SC
		Config:	Normal

Informe Resumen de Cortocircuito

1/2 Ciclo - Comandos de Falta Trifásica, LG, LL, y LIG

Tensión pre Falta = 100 % de la Tensión Nominal de Barra

Barra	ID	kV	Falta Trifásica			Falta Línea-a-Tierra			Falta Línea-a-Línea			*Línea-a-Línea-a-Tierra		
			Activa	Imag	Mag	Activa	Imag	Mag	Activa	Imag	Mag	Activa	Imag	Mag
Bar1		4.38	3.973	-34.420	34.649	8.132	-23.489	24.017	29.893	3.408	30.000	-33.971	5.118	34.333
Bar2		4.38	4.876	-31.384	31.952	8.113	-17.386	18.143	27.394	4.172	25.670	-30.803	1.890	30.820

Fuente: Los autores, 2013.

Ilustración 101 Análisis de cortocircuito Salitral Máxima Generación 4 Ciclos.

Proyecto:	ETAP	Página:	11
Ubicación:	7.5.9	Fecha:	20-07-2013
Contrato:		SN:	12345678
Ingeniero:		Revisión:	Base
Archivo:	PROYECTO_TESD	Caso de Estudio:	SC
		Config:	Normal

Informe Resumen de Cortocircuito

1.5-4 ciclos - Comandos de Falta Trifásica, LG, LL, y LIG

Tensión pre Falta = 100 % de la Tensión Nominal de Barra

Barra	ID	kV	Falta Trifásica			Falta Línea-a-Tierra			Falta Línea-a-Línea			*Línea-a-Línea-a-Tierra		
			Activa	Imag	Mag	Activa	Imag	Mag	Activa	Imag	Mag	Activa	Imag	Mag
Bar1		4.38	3.027	-33.326	33.557	8.049	-23.314	24.044	29.326	3.403	29.522	-33.330	4.998	33.763
Bar2		4.38	4.803	-30.577	30.885	8.039	-17.275	18.034	26.886	4.162	27.246	-30.349	1.436	30.523

Fuente: Los autores, 2013.

Ilustración 102 Análisis de cortocircuito Salitral Máxima Generación 30 Ciclos.

Proyecto:	ETAP	Página:	11
Ubicación:	7.5.0	Fecha:	20-07-2013
Contato:		SN:	12345678
Ingeniero:	Caso de Estudio - SC	Revisión:	Base
Archivo:	PROYECTO_TESIS	Config:	Normal

Informe Resumen de Cortocircuito

Cantidad de Falta en Estado Estable (30 ciclos) - Trifásica, LL, LL y LLL

Tensión por Falta = 100 % de la Tensión Nominal de Barra

Barra	ID	kV	Falta Trifásica			Falta Línea-a-Tierra			Falta Línea-a-Línea			*Línea-a-Línea-a-Tierra		
			Activa	Imag	Mag	Activa	Imag	Mag	Activa	Imag	Mag	Activa	Imag	Mag
Bus1		4.16	3.868	-31.409	31.819	7.662	-22.937	23.785	27.219	3.340	27.408	-31.280	0.669	31.669
Bus2		4.16	4.722	-26.625	26.814	7.609	-16.756	16.440	24.788	4.098	25.127	-28.145	1.523	28.287

Fuente: Los autores, 2013.

Ilustración 103 Análisis de cortocircuito Salitral Mínima Generación 1/2 Ciclo.

Proyecto:	ETAP	Página:	11
Ubicación:	7.5.0	Fecha:	20-07-2013
Contato:		SN:	12345678
Ingeniero:	Caso de Estudio - SC	Revisión:	Base
Archivo:	PROYECTO_UEMIS	Config:	Normal

Informe Resumen de Cortocircuito

1/2 Ciclo - Cantidad de Falta Trifásica, LL, LL y LLL

Tensión por Falta = 100 % de la Tensión Nominal de Barra

Barra	ID	kV	Falta Trifásica			Falta Línea-a-Tierra			Falta Línea-a-Línea			*Línea-a-Línea-a-Tierra		
			Activa	Imag	Mag	Activa	Imag	Mag	Activa	Imag	Mag	Activa	Imag	Mag
Bus1		4.16	3.623	-32.391	32.584	7.729	-22.873	24.140	28.928	3.104	28.180	-32.098	0.399	32.548
Bus2		4.16	4.419	-28.876	30.181	7.782	-17.884	16.777	23.869	3.790	26.346	-28.351	1.899	28.418

Fuente: Los autores, 2013.

Ilustración 104 Análisis de cortocircuito Salitral mínima Generación 4 Ciclos.

Proyecto:	ETAP			Página:	11
Ubicación:	7.5.0			Fecha:	20-07-2013
Contato:				SN:	12345678
Ingeniero:	Caso de Estudio: SC			Revisión:	Base
Archivo:	PROYECTO_TESIS			Config:	Normal

Informe Resumen de Cortocircuito

1.5-4 ciclos - Constantes de Falta Trifásica, L-G, LL, y L-L-G

Tensión pre Falta = 100 % de la Tensión Nominal de Barra

Barra	ID	KV	Falta Trifásica			Falta Línea-a-Tierra			Falta Línea-a-Línea			*Línea-a-Línea-a-Tierra		
			Activa	Imag.	Mag.	Activa	Imag.	Mag.	Activa	Imag.	Mag.	Activa	Imag.	Mag.
Bus1		4.16	5.576	-31.278	31.462	7.623	-22.008	23.034	27.334	1.100	21.707	-31.487	5.228	31.877
Bus2		4.16	4.380	-28.808	28.028	7.715	-18.985	18.636	25.384	3.781	21.674	-28.709	1.763	28.804

Fuente: Los autores, 2013.

Ilustración 105 Análisis de cortocircuito Salitral mínima Generación 30 Ciclos.

Proyecto:	ETAP			Página:	11
Ubicación:	7.5.0			Fecha:	20-07-2013
Contato:				SN:	12345678
Ingeniero:	Caso de Estudio: SC			Revisión:	Base
Archivo:	PROYECTO_TESIS			Config:	Normal

Informe Resumen de Cortocircuito

Constante de Falta en Estado Estable (30 ciclos) - Trifásica, L-G, LL, y L-L-G

Tensión pre Falta = 100 % de la Tensión Nominal de Barra

Barra	ID	KV	Falta Trifásica			Falta Línea-a-Tierra			Falta Línea-a-Línea			*Línea-a-Línea-a-Tierra		
			Activa	Imag.	Mag.	Activa	Imag.	Mag.	Activa	Imag.	Mag.	Activa	Imag.	Mag.
Bus1		4.16	1.018	-29.330	29.039	7.218	-21.838	22.993	25.418	1.646	25.209	-28.773	1.204	29.846
Bus2		4.16	4.286	-28.907	27.248	7.351	-18.803	17.973	23.302	3.726	23.897	-28.702	1.869	28.768

Fuente: Los autores, 2013.

Ilustración 106 Análisis de cortocircuito TIC Máxima Generación ½ Ciclo.

Proyecto:	ETAP	Página:	11
Ubicación:	7.5.0	Fecha:	20-07-2013
Contrato:		SN:	12345678
Ingeniero:	Case de Estudio: SC	Revisión:	Base
Archivo:	PROYECTO_TESIS	Config.:	Normal

Informe Resumen de Cortocircuito

1/2 Ciclo - Corrientes de Falta Trifásica, LG, LL, y LLG

Tensión por Falta = 100 % de la Tensión Nominal de Barra

Barra	ID	Falta Trifásica			Falta Línea-a-Tierra			Falta Línea-a-Línea			*Línea-a-Línea-a-Tierra			
		IV	Activa	Imag	Mag.	Activa	Imag.	Mag.	Activa	Imag.	Mag.	Activa	Imag.	Mag.
Bar3		4.18	2.823	-25.019	23.168	8.598	-21.046	22.063	23.401	2.413	23.529	-22.228	5.889	27.840
Bar6		4.18	3.386	-28.344	23.579	8.888	-35.141	17.541	21.949	2.997	22.341	-23.284	2.836	25.423

Fuente: Los autores, 2013.

Ilustración 107 Análisis de cortocircuito TIC Máxima Generación 4 Ciclos.

Proyecto:	ETAP	Página:	11
Ubicación:	7.5.0	Fecha:	20-07-2013
Contrato:		SN:	12345678
Ingeniero:	Case de Estudio: SC	Revisión:	Base
Archivo:	PROYECTO_TESIS	Config.:	Normal

Informe Resumen de Cortocircuito

1,5-4 ciclos - Corrientes de Falta Trifásica, LG, LL, y LLG

Tensión por Falta = 100 % de la Tensión Nominal de Barra

Barra	ID	Falta Trifásica			Falta Línea-a-Tierra			Falta Línea-a-Línea			*Línea-a-Línea-a-Tierra			
		IV	Activa	Imag	Mag.	Activa	Imag.	Mag.	Activa	Imag.	Mag.	Activa	Imag.	Mag.
Bar3		4.18	2.776	-25.926	26.074	8.473	-26.817	21.786	22.954	2.447	23.646	-26.348	5.847	27.182
Bar6		4.18	3.348	-28.268	26.498	8.778	-33.902	17.388	21.470	2.886	23.665	-24.658	2.562	24.797

Fuente: Los autores, 2013.

Ilustración 108 Análisis de cortocircuito TIC Máxima Generación 30 Ciclos.

Proyecto:	ETAP	Página:	11
Ubicación:	7.5.0	Fecha:	29-07-2013
Contato:		SN:	12345678
Ingeniero:		Revisión:	Base
Archivo:	PROYECTO_TESIS	Caso de Estudio:	SC
		Config.:	Normal

Informe Resumen de Cortocircuito

Corriente de Falta en Estado Estable (10 ciclos) - Trifásica, L-L, LL, y L-LG

Tensión por Falta = 100 % de la Tensión Nominal de Barra

Barra	ID	kV	Falta Trifásica			Falta Línea-a-Tierra			Falta Línea-a-Línea			*Línea-a-Línea-a-Tierra		
			Activa	Imag.	Mag.	Activa	Imag.	Mag.	Activa	Imag.	Mag.	Activa	Imag.	Mag.
Bus5		4.16	2.718	-34.018	24.130	6.088	-19.778	20.862	20.860	2.347	20.902	-24.466	5.689	25.119
Bus6		4.16	3.279	-22.371	22.610	6.380	-12.288	16.358	18.374	2.617	19.581	-22.594	2.659	22.782

Fuente: Los autores, 2013.

Ilustración 109 Análisis de cortocircuito TIC mínima Generación ½ Ciclo

Proyecto:	ETAP	Página:	11
Ubicación:	7.5.0	Fecha:	24-07-2013
Contato:		SN:	12345678
Ingeniero:		Revisión:	Base
Archivo:	PROYECTO_TESIS	Caso de Estudio:	BC
		Config.:	Normal

Informe Resumen de Cortocircuito

1/2 Ciclo - Corriente de Falta Trifásica, L-L, LL, y L-LG

Tensión por Falta = 100 % de la Tensión Nominal de Barra

Barra	ID	kV	Falta Trifásica			Falta Línea-a-Tierra			Falta Línea-a-Línea			*Línea-a-Línea-a-Tierra		
			Activa	Imag.	Mag.	Activa	Imag.	Mag.	Activa	Imag.	Mag.	Activa	Imag.	Mag.
Bus7		4.16	2.998	-22.646	22.842	5.884	-19.087	18.973	19.613	2.536	19.779	-22.254	3.348	23.840
Bus8		4.16	3.317	-23.480	21.734	6.197	-18.884	16.271	18.683	2.831	18.818	-21.802	2.385	21.496

Fuente: Los autores, 2013.

Ilustración 110 Análisis de cortocircuito TIC mínima Generación 4 Ciclos.

Proyecto:	ETAP			Página:	11
Ubicación:	7.5.0			Fecha:	24-07-2013
Contorno:				SN:	12345678
Ingeniero:	Caso de Estudio: SC			Revisión:	Base
Archivo:	PROYECTO_TESIS			Config:	Normal

Informe Resumen de Cortocircuito

1,5-4 ciclos - Corrientes de Falta Trifásica, LG, LL, y LLL

Tensión pre Falta = 100 % de la Tensión Nominal de Barra

Barra	ID	kV	Falta Trifásica			Falta Línea-a-Tierra			Falta Línea-a-Línea			*Línea-a-Línea-a-Tierra		
			Activa	Imag	Mag	Activa	Imag	Mag	Activa	Imag	Mag	Activa	Imag	Mag
Bus1		4.16	2.946	-21.572	23.712	1.786	-10.004	10.603	10.121	2.152	10.288	-21.529	0.101	23.112
Bus2		4.16	2.284	-20.440	20.660	0.000	-10.010	10.024	10.122	2.829	10.340	-21.140	2.475	21.285

Fuente: Los autores, 2013.

Ilustración 111 Análisis de cortocircuito TIC mínima Generación 30 Ciclos.

Proyecto:	ETAP			Página:	11
Ubicación:	7.5.0			Fecha:	24-07-2013
Contorno:				SN:	12345678
Ingeniero:	Caso de Estudio: SC			Revisión:	Base
Archivo:	PROYECTO_TESIS			Config:	Normal

Informe Resumen de Cortocircuito

Corriente de Falta en Estado Estable (30 ciclos) - Trifásica, LG, LL, y LLL

Tensión pre Falta = 100 % de la Tensión Nominal de Barra

Barra	ID	kV	Falta Trifásica			Falta Línea-a-Tierra			Falta Línea-a-Línea			*Línea-a-Línea-a-Tierra		
			Activa	Imag	Mag	Activa	Imag	Mag	Activa	Imag	Mag	Activa	Imag	Mag
Bus1		4.16	2.877	-19.648	19.854	0.328	-17.863	18.104	17.012	2.462	17.194	-20.442	0.161	21.081
Bus2		4.16	3.197	-18.580	18.774	0.640	-13.948	14.048	14.022	2.760	16.280	-19.081	2.576	19.251

Fuente: Los autores, 2013.

Ilustración 112 Impedancia de secuencias en análisis de cortocircuito.

Proyecto:	ETAP	Página:	12
Ubicación:	7.3.0	Fecha:	24-07-2013
Centro:		S/N:	12345678
Ingeniero:		Revisión:	Base
Archivo:	PROYECTO_TESIS	Config:	Normal

Informe Resumen de Cortocircuito

Buses	VV	Impedancia Sec. Positiva (ohm)			Imp. Secuencia Negativa (ohm)			Imp. de Secuencia Cero (ohm)		
		Resistencia	Reactancia	Impedancia	Resistencia	Reactancia	Impedancia	Resistencia	Reactancia	Impedancia
Bus5	4.300	0.0173	0.11976	0.12097	0.0173	0.11976	0.12097	0.07908	0.13610	0.15747
Bus6	4.300	0.0278	0.12006	0.12793	0.0278	0.12006	0.12793	0.04613	0.10971	0.23914

Fuente: Los autores, 2013.

Es importante señalar que en el informe de corrientes de cortocircuitos, fueron simuladas las fallas en el bus 5 de la subestación eléctrica de Crudo1 y una falla en el bus 6 (bus imaginario) que corresponde a los terminales del motor síncrono.

Podemos apreciar a manera de ejemplo, en el análisis de cortocircuito de TIC máxima generación a medio ciclo, existirá en el momento de una falla trifásica simétrica cero voltios en los terminales del motor (bus 6) a una corriente de 25,5 kA y para una falla monofásica 0 voltios en la línea a tierra del motor, mientras que las otras dos líneas registrarán un valor por encima de 100% del voltaje nominal a una corriente de 17,5 kA.

Todas las corrientes de fallas registradas en el reporte de cortocircuito, son corrientes momentáneas simétricas, es decir, durante un cortocircuito no se considera la componente dc, y esto es muy importante considerarlo para la selección de interruptores, y se distingue de dos valores de corrientes, la primera es la corriente instantánea, que es la corriente que debe soportar un interruptor en el instante de ocurrida la falla, y la segunda corriente se denomina corriente de interrupción, que es la corriente que debe soportar el interruptor en el instante que abre sus contactos,

para aquello se consideran las reactancias su transitorias de generadores y reactancia transitorias de condensadores y motores síncronos.

El resultado obtenido en todos los informes de cortocircuito, nos permite de manera ordenada, agrupar los valores de corrientes de fallas trifásica y monofásica para máxima y mínima generación y así poder seleccionar los valores más bajos para falla monofásica y valores más altos para fallas trifásicas de cada selección, para poder utilizarlos en la verificación de capacidad de interrupción del contactor del arrancador del motor síncrono, y en el análisis de cortocircuito como son los valores de disparo para fallas de sobrecorriente instantánea.

A continuación se muestran los valores obtenidos en la clasificación de las magnitudes de corrientes para fallas monofásica y trifásica en el bus 5 y bus 6 de la subestación eléctrica de Crudo 1.

Tabla 16 Magnitudes de corrientes para fallas monofásicas y trifásicas en bus 5 –bus 6.

BUS	FALLA 1 ϕ	FALLA 3 ϕ
BUS 5	21,0kA	34,6kA
BUS 6	19,2KA	31,9kA

Fuente: Los autores, 2013.

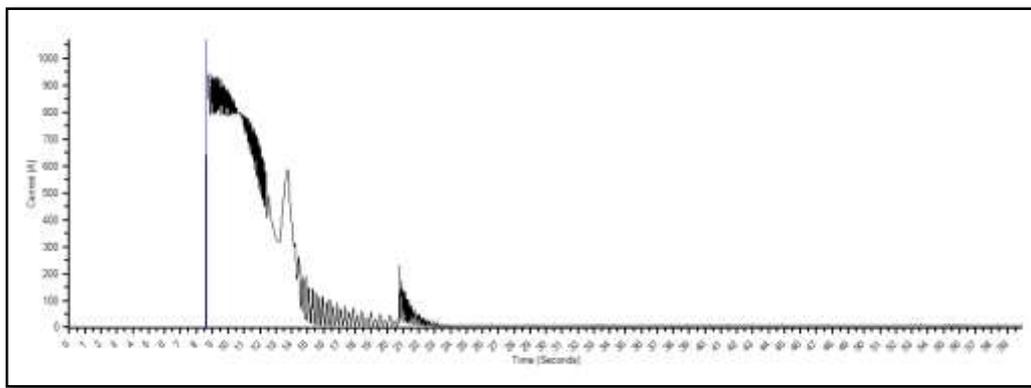
4.3 Análisis obtenidos de la curva de arranque del motor.

Para el análisis de la curva de arranque del motor síncrono fueron obtenidos por el equipo Pdma Emax, este equipo, una de sus funciones es graficar la curva de arranque de motores eléctricos, la cual nos permite verificar el tiempo máximo real de aceleración del estado “parado” al estado “marchando “de los motores , a su vez ,medir la corriente máxima de arranque ,y la corriente de operación sin carga , ya que este motor síncrono una vez terminada su secuencia de arranque ,su carga no es accionada inmediatamente por el hecho de que su carga no está accionada o acoplada directamente al eje del motor ,sino ,a su vez están conectados por medio de un embrague neumático.

Este paso es muy importante realizarlo, si no se tiene información de la curva característica de arranque del motor dada por el fabricante, ya que nos permite tener una clara visión del comportamiento del motor y visualizar los límites de corrientes en el momento de su arranque, asegurando poder ajustar las protecciones eléctricas de una manera más segura y confiable.

4.3.1 Resultados obtenidos en curva de arranque de motor síncrono CB 361-1X3.

Ilustración 113 Curva de arranque del motor síncrono del molino de bolas de Crudo.



Fuente: Los autores, 2013.

Se puede observar en la curva de arranque del motor síncrono, un pico de corriente aproximada de 1000 amperios, de allí decae la corriente por debajo de la corriente nominal del motor a un tiempo de 6 segundos, este tiempo se denomina tiempo de aceleración, luego se observa un pico de corriente hasta 600 amperios, en ese instante es cuando el motor llega al 95% de la velocidad síncrona y es actuado el contactor de campo para llegar al sincronismo del motor.

Se puede observar otro pico de corriente a los diez segundos de iniciado el arranque, esto se debe que en ese instante de tiempo fue cerrado el contactor principal del molino y bypass el contactor del reactor para terminar la secuencia de arranque.

Ilustración 114 Magnitudes de corriente y voltaje en Curva de arranque del motor síncrono del molino de bolas de Crudo.

Probe Setting		Condition Code	
0-10 (PdMA 2128.14)		Normal	
VOLTAGE			
	Fund RMS	Tot RMS	C.F. THD
Voltage 1-2	4038.44	4207.17	1.45 1.18
Voltage 2-3	4037.48	4208.15	1.44 1.18
Voltage 1-3	4033.57	4204.37	1.44 1.23
Average	4035.82	4206.95	
% Imbalance	0.06	0.05	HVF 0.00
% NEMA Derating	100.00	% NEMA Derating	100.00
CURRENT			
	Fund RMS	Tot RMS	C.F. THD
Current 1	205.78	205.85	1.53 1.89
Current 2	213.95	214.03	1.50 1.27
Current 3	194.40	194.52	1.52 2.09
Average	204.71	204.81	
% Imbalance	5.03	5.03	
% FLA	52.09	52.11	
IMPEDANCE			
	Real	Magnitude	Angle
Phase 1	11.22	11.45	-11.97
Phase 2	10.98	11.23	-7.06
Phase 3	12.03	12.13	-7.94
% Imbalance	5.45		
POWER			
	kW	kVAR	kVA PF
Phase 1	470.18	59.93	485.58 0.98
Phase 2	501.14	64.30	605.28 0.99
Phase 3	454.12	85.36	483.87 0.99
Total	1430.45	210.00	1449.70 0.99
Power Sequence	1430.45	223.98	1447.81 0.99
Efficiency			
Efficiency	N/C		
HP Output	N/C		
kW Output	N/C		
Torque Output (N-m)	N/C		
SEQUENCE			
	Positive	Negative	Zero
Voltage Ph-Ph	4035.82	2.33	0.00
Voltage Ph-N	2358.56	1.35	0.00
Current	204.98	10.77	0.38
	Self	Angle	Mutual Angle
Zero	11.53	361.11	11.53 231.11
Positive	0.60	282.76	0.60 13.84
Negative	0.04	82.68	0.04 83.03
Phase Configuration	Phase to Ground - 120 Degree		
Phase Rotation	Clockwise		

Fuente: Los autores, 2013.

El tiempo de aceleración del motor es un valor muy importante, porque nos permite ajustar la protección adecuada en un evento de atascamiento en el arranque del motor.

A continuación detallamos los valores registrados por el equipo Pdma Emax en el arranque del motor síncrono del molino de bola de Crudo, se puede observar el tiempo total de arranque del motor es aproximadamente 10 segundos.

Ilustración 115 Registro Curva de arranque del motor síncrono del molino de bolas de Crudo.

Start Time	8.63
Start Amp.	1068.1
End Time	18.55
Delta Time	9.92
<input type="button" value="Start"/> <input type="button" value="End"/>	

Fuente: Los autores, 2013.

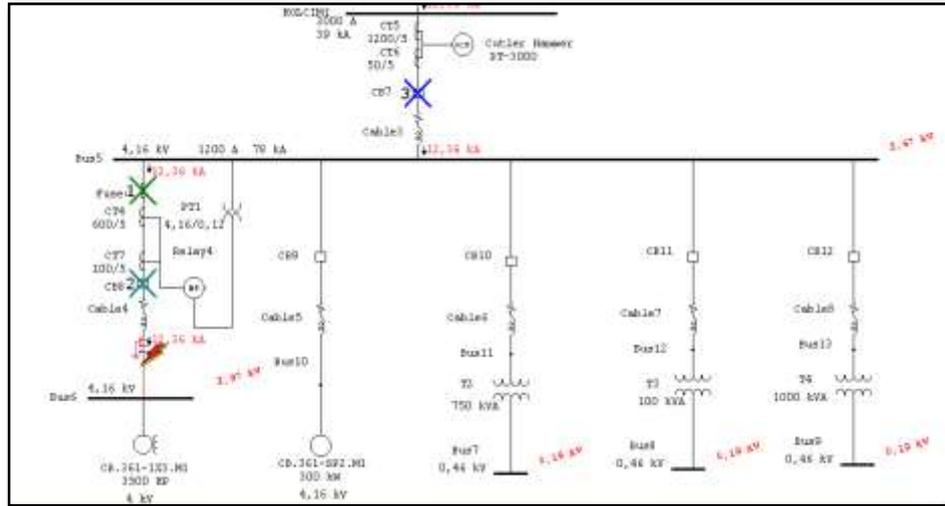
4.4.1 Resultados obtenidos en grafica de coordinación relé Cutler Hammer MP300.

Como se muestra en la figura obtenida, se puede apreciar que en la curva de arranque versus la curva de protección de sobrecorriente del relé, no se intersectan en el momento de arranque a 65% del voltaje nominal por lo que no presenta ningún disparo no deseado en el inicio de secuencia de arranque del motor pero podemos observar que las curvas del relé del motor síncrono con la curva del relé aguas arriba que protege el alimentador de la subestación del molino de Crudo existe una mala coordinación ya que si el motor iniciaría su marcha en condición de atascamiento o de rotor bloqueado a un nivel de 1300 amperios , a los dos segundos de iniciado su marcha dispara por protección de sobrecorriente el relé aguas arriba aislando toda la subestación eléctrica de Crudo y no solamente el área afectada.

Sin embargo es necesario señalar que las protección de atascamiento y la protección de sobre corriente instantánea están habilitadas, por lo cual resulta en un mal ajuste, ya que el elemento que energiza al motor es un contactor de alto voltaje que no tiene características de interrupción para altas corrientes de falla, provocando la destrucción del contactor.

Simulando una falla monofásica en los terminales del motor síncrono del molino de bolas de Crudo, es posible visualizar mediante el programa ETAP 7,5 la secuencia de disparos de los diferentes elementos de protección del sistema.

Ilustración 117 Falla monofásica en terminales del motor simulado en el programa ETAP 7,5.²³



Fuente: Los autores, 2013.

Una falla monofásica producido en los terminales del motor, producida una corriente de 23,9kA lo cual producirá el disparo del fusible que contiene el contactor del arrancador del motor síncrono, seguido de un disparo del contactor por disparo de sobrecorriente instantánea, lo cual es perjudicial como se mencionó anteriormente ya que el contactor no tiene la capacidad de interrupción de abrir sus contactos a ese nivel de corriente, lo ideal sería que si no se fundió los fusibles en el momento de la falla , la protección de respaldo seria aguas el relé aguas arriba del lugar donde ocurrió la falla.

Ilustración 118 Secuencia de operación para una falla monofásica en los terminales del motor síncrono.

Sequence-of-Operation Events - Output Report: FALLA_MONO_MOTOR					
3-Phase (Asymmetrical) fault on connector between Bus6 & Cable4. Adjacent bus: Bus6					
Data Rev.: Base		Config: Normal		Date: 24-12-2013	
Time (ms)	ID	If (kA)	T1 (ms)	T2 (ms)	Condition
10,0	Fuse6	23,906	< 10,0	< 10,0	
83,3	Relay4	23,906	83,3		Overload Phase - Instantaneous
167	CB8		83,3		Tripped by Relay4 Overload Phase - Instantane...
500	Relay9	23,448	500		Phase - OC1 - 50
583	CB6		83,3		Tripped by Relay9 Phase - OC1 - 50
1500	Cutler Ham...	23,448	1500		Phase - OC1 - 50
1583	CB7		83,3		Tripped by Cutler Hammer Phase - OC1 - 50
1684	Relay10	1,414	1684		Phase - OC1 - 51
10000	Relay4	23,906	10000		Jam
10083	CB8		83,3		Tripped by Relay4 Jam

Fuente: Los autores, 2013.

²³ Se puede visualizar en el anexo A la ilustración para su mayor entendimiento.

4.5 Análisis de los ajustes de protecciones del relé General Electric SR469.

Para el análisis de los ajustes de protecciones del relé General Electric SR469, fue necesario en su primera instancia recordar los ajustes mínimos necesarios descritos en la norma IEEE C37.96, luego, recopilar las protecciones necesarias para el motor síncrono del molino de bolas del área de Crudo e ingresarlas al programa, estos ajustes fueron ingresados en el programa EnerVista de General Electric y transferido al relé General Electric SR469 realizando una descarga en el mismo programa.

En el reporte muestra todos los ajustes configurados para la protección del motor síncrono, como se detalla a continuación los ajustes elaborado por el programa EnerVista 469 de General Electric.

Ilustración 119Ajuste de preferencias relé SR469 en programa EnerVista.

469 SETUP	
PREFERENCES	
Default Message Cycle Time	2.0 s
Default Message Timeout	300 s
Average Motor Load Calculation Period	15 min
Temperature Display Units	Celsius
Trace Memory Trigger Position	25 %
Trace Memory Buffers	8 x 28 cycles
Display Update Interval	0.4 s
Motor Load Filter Interval	0 cycles
MESSAGE SCRATCHPAD	
First Scratchpad Message	MOTOR MOLINO BOLAS
Second Scratchpad Message	
Third Scratchpad Message	
Fourth Scratchpad Message	
Fifth Scratchpad Message	CB.361-1X3.M1
COMMUNICATION	
Ethernet Subnet Mask	255.255.255. 0
DeviceNet MAC ID	1
DeviceNet Baud Rate	125 kbps
Front RS232 baud rate	19200 baud
Slave Address	254
Computer RS485 Baud Rate	9600 baud
Computer RS485 Parity	None
Auxiliary RS485 Baud Rate	9600 baud
Auxiliary RS485 Parity	None

Fuente: Los autores, 2013.

Ilustración 120 Ajuste de corriente y voltaje relé SR469 en programa EnerVista.

SYSTEM SETUP	
CURRENT SENSING	
Phase CT Primary	400 A
Motor Full Load Amps	393 A
Ground CT Type	5 A Secondary
Ground CT Primary	100 A
Phase Differential CT Type	5 A Secondary
Phase Differential CT Primary	600 A
VOLTAGE SENSING	
Voltage Transformer Connection Type	Open Delta
Voltage Transformer Ratio	35.00 :1
Motor Nameplate Voltage	4200 V
POWER SYSTEM	
Nominal System Frequency	60 Hz
System Phase Sequence	ABC
REDUCED VOLTAGE	
Reduced Voltage Starting	On/Yes
Control Relays for Reduced Voltage Starting	Auxiliary 3
Transition On	Current Only
Reduced Voltage Start Level	100 % FLA
Reduced Voltage Start Timer	8 s
Incomplete Sequence Trip Relays	Trip & Aux2

Fuente: Los autores, 2013.

Ilustración 121 Ajuste de entradas y salidas digitales relé SR469 en programa EnerVista.

DIGITAL INPUTS	
STARTER	
Starter Status Switch	Start Aux a
OUTPUT RELAYS	
TRIP RELAY	
Force R1 Operate Time	0 s
ALARM RELAY	
Force R4 Operate Time	0 s
AUX RELAY 2	
Force R2 Output Operate Time	0 s
AUX RELAY 3	
Force R3 Operate Time	0 s
BLOCK START RELAY	
Force R5 Operate Time	2 s

Fuente: Los autores, 2013.

Ilustración 122 Ajuste de protección térmica relé SR469 en programa EnerVista.

469 THERMAL MODEL	
Curve Style	Standard
Overload Pickup Level	1.05 FLA
Cool Time Constant Running	15 min
Cool Time Constant Stopped	30 min
Hot/Cold Safe Stall Ratio	1.00
RTD Biasing	On/Yes
RTD Bias Minimum	40 °C
RTD Bias Center Point	110 °C
RTD Bias Maximum	130 °C
Thermal Capacity Alarm Relays	Alarm
Thermal Capacity Alarm Level	100 % used
Thermal Capacity Alarm Events	On/Yes
Overload Trip Relays	Trip & Aux2
OVERLOAD CURVE	
Standard Overload Curve Number	1
OVERLOAD ALARM	
Overload Alarm	Unlatched
Overload Alarm Relays	Alarm
Overload Alarm Events	On/Yes
Overload Alarm Delay	2.0 s

Fuente: Los autores, 2013.

Ilustración 123 Ajuste de protección de corriente relé SR469 en programa EnerVista.

UNDERCURRENT	
Block Undercurrent from Start	0 s
CURRENT UNBALANCE	
Current Unbalance Alarm	Unlatched
Current Unbalance Alarm Relays	Alarm
Current Unbalance Alarm Pickup	15 %
Current Unbalance Alarm Delay	10 s
Current Unbalance Alarm Events	On/Yes
Current Unbalance Trip	Latched
Current Unbalance Trip Relays	Trip & Aux2
Current Unbalance Trip Pickup	20 %
Current Unbalance Trip Delay	4 s
GROUND FAULT	
Ground Fault Trip	Latched
Ground Fault Trip Relays	Trip & Aux2
Ground Fault Trip Pickup	0.10 CT
Intentional GF Trip Delay	500 ms
MOTOR STARTING	
ACCELERATION TIMER	
Acceleration Timer Trip	Latched
Acceleration Timer Trip Relays	Trip & Aux2
Acceleration Timer from Start	8.0 s

Fuente: Los autores, 2013.

Ilustración 124 Ajuste de RTD relé SR469 en programa EnerVista.

<u>RTD #1</u>	
RTD #1 Application	Stator
RTD #1 Name	T1
RTD #1 Alarm	Latched
RTD #1 Alarm Relays	Alarm
RTD #1 Alarm Temperature	100 °C
RTD #1 Alarm Events	On/Yes
RTD #1 Hi Alarm	Unlatched
RTD #1 Hi Alarm Relays	Alarm
RTD #1 Hi Alarm Level	85 °C

Fuente: Los autores, 2013.

Ilustración 125 Ajuste de protección de voltaje relé SR469 en programa EnerVista.

<u>VOLTAGE ELEMENTS</u>	
<u>UNDERVOLTAGE</u>	
Undervoltage Active Only If Bus Energized	On/Yes
Undervoltage Trip	Latched
Undervoltage Trip Mode	3-Phase
Undervoltage Trip Relays	Trip & Aux2
Undervoltage Trip Pickup	0.85 Rated
Starting Undervoltage Trip Pickup	0.60 Rated
Undervoltage Trip Delay	3.0 s
<u>OVERVOLTAGE</u>	
Overvoltage Alarm	Unlatched
Overvoltage Relays	Alarm
Overvoltage Alarm Pickup	1.05 Rated
Overvoltage Alarm Delay	10.0 s
Overvoltage Alarm Events	On/Yes
Overvoltage Trip	Latched
Overvoltage Trip Relays	Trip
Overvoltage Trip Pickup	1.10 Rated
Overvoltage Trip Delay	3.0 s
<u>FREQUENCY</u>	
Voltage Frequency Trip	Latched
Voltage Frequency Trip Relays	Trip & Aux2
Overfrequency Trip Level	60.50 Hz
Underfrequency Trip Level	59.40 Hz
Voltage Frequency Trip Delay	0.2 s

Fuente: Los autores, 2013.

Ilustración 126 Ajuste de salidas análogas relé SR469 en programa EnerVista.

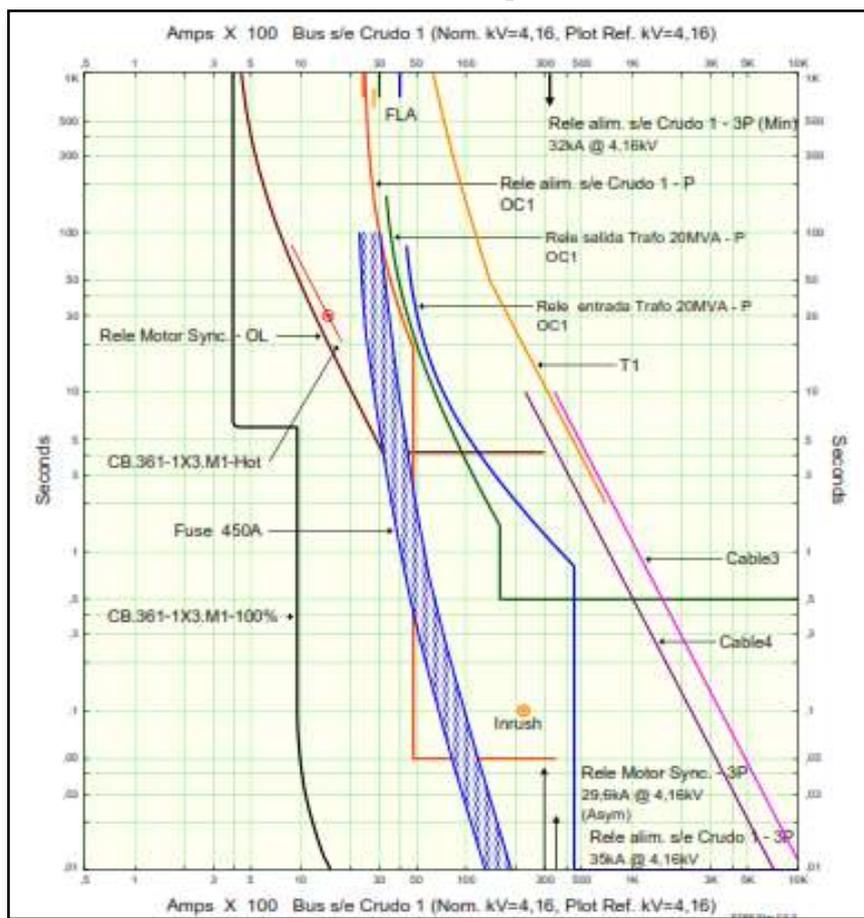
<u>ANALOG OUTPUTS</u>	
Analog Output 1 Selection	Real Power (kW)
Analog Output 2 Selection	Average Phase Current
Analog Output 3 Selection	None
Analog Output 4 Selection	None
Average Phase Current Minimum	0 A
Average Phase Current Maximum	400 A
Real Power Minimum	0 kW
Real Power Maximum	2883 kW

Fuente: Los autores, 2013.

4.6 Resultados obtenidos en grafica de coordinación relé General Electric SR469.

Después de ajustar las diferentes protecciones en el relé General Electric SR469, se procede a verificar la coordinación del relé con la curva de arranque del motor síncrono y con la relé que sirve como protección de respaldo (aguas arriba) CB.E21-1S2 ubicado en la subestación principal de la planta Holcim, la cual protege el alimentador de la subestación eléctrica del área del molino de Crudo 1.

Ilustración 127 Coordinación curva de protección del relé SR469. ²⁴



Fuente: Los autores, 2013.

En la programación del equipo no se ajustó en el relé General Electric SR469 la protección de sobrecorriente instantánea (protección 50), debido a que el arrancador del motor síncrono es un contactor, y no posee la capacidad de interrupción o apertura de sus contactos en una falla de magnitudes de muy por encima de la corriente de rotor bloqueado(LRC).

Para este tipo de fallas el contactor posee fusibles de curva de corriente-tiempo muy inversa, la cual protege para fallas de magnitudes de corrientes muy altas.

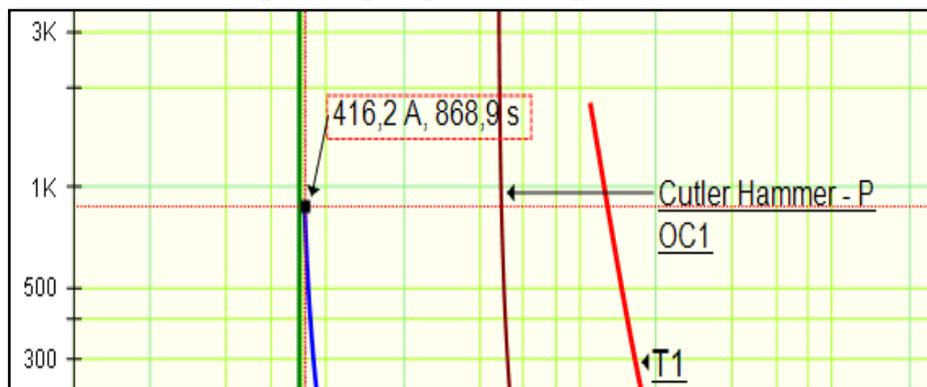
²⁴ Se puede visualizar en el anexo A la ilustración para su mayor entendimiento.

En las curvas se identifica que existe un buen ajuste de:

1. Protección de secuencia incompleta (8sg) por debajo del límite térmico en caliente del rotor.
2. Curva de protección térmica (49) por encima de la curva de arranque del motor.
3. Protección de secuencia incompleta (8sg) por encima de la curva de arranque del motor.
4. Curvas de fusible protegiendo adecuadamente fallas por sobrecorrientes (50).
5. Curva del relé Digitrip3000 (protección de respaldo del motor síncrono) por encima de la curva de arranque del motor y de las curvas de protección del relé General Electric SR469.
6. Limite térmico del cable que alimenta el motor síncrono por encima de la máxima corriente de cortocircuito en ese punto.
7. Limite térmico del cable que alimenta el bus de la subestación eléctrica de Crudo 1 por encima de la máxima corriente de cortocircuito en ese punto.

El disparo por sobrecarga del motor está ajustado a $1,05 \times \text{FLA}$ en el relé General Electric SR469 quedando demostrado el mismo tiempo en la curva realizada por el programa ETAP versus la tabla generada por el fabricante General Electric para el mismo relé.

Ilustración 128 Tiempo de disparo por sobrecarga relé General Electric SR469.



Fuente: Los autores, 2013.

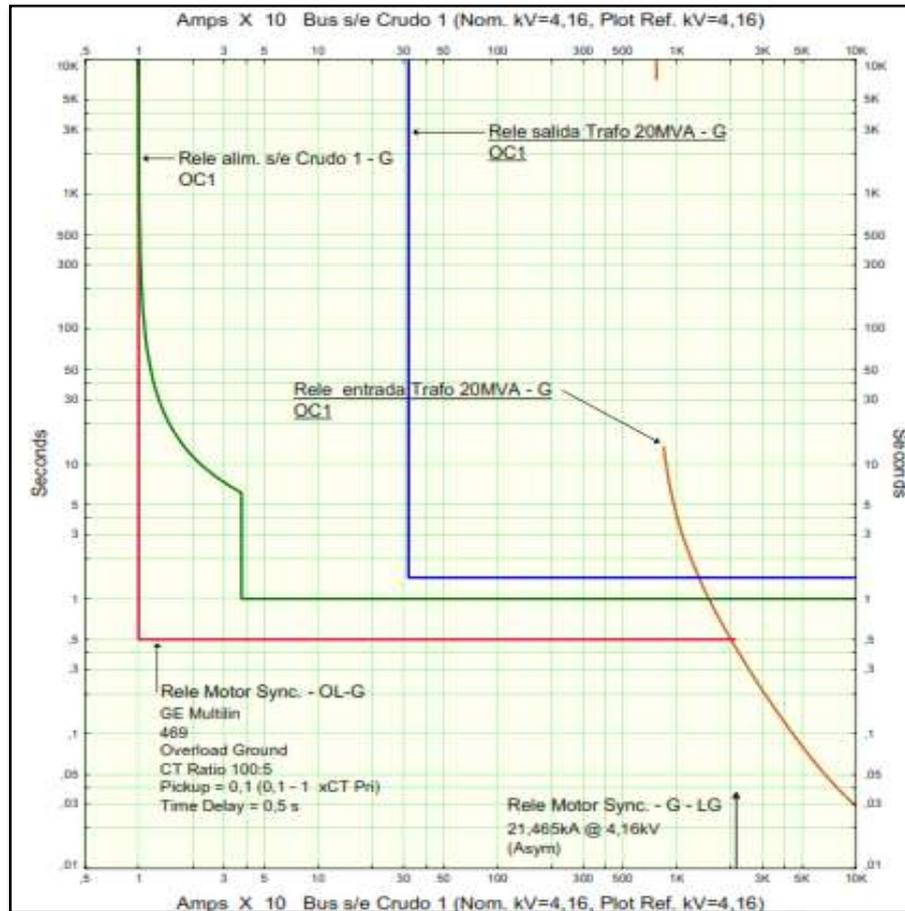
Ilustración 129 Tiempo de disparo de ajuste de sobrecarga por tabla relé SR469.

Tabla 4-2 CURVAS DE SOBRECARGA NORMALES DEL SR469

NIVEL DE S/C	MULTIPLICADORES DE CURVA NORMAL														
	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9	x10	x11	x12	x13	x14	x15
1.01	4353.6	8707.2	13061	17414	21768	26122	30475	34829	39183	43536	47890	52243	56597	60951	65304
1.05	853.71	1707.4	2561.1	3414.9	4268.6	5122.3	5976.0	6829.7	7683.4	8537.1	9390.8	10245	11098	11952	12806
1.10	416.68	833.36	1250.0	1666.7	2083.4	2500.1	2916.8	3333.5	3750.1	4166.8	4583.5	5000.2	5416.9	5833.6	6250.2
1.20	198.86	397.72	596.58	795.44	994.30	1193.2	1392.0	1590.9	1789.7	1988.6	2187.5	2386.3	2585.2	2784.1	2982.9
1.30	126.80	253.61	380.41	507.22	634.02	760.82	887.63	1014.4	1141.2	1268.0	1394.8	1521.6	1648.5	1775.3	1902.1

Fuente: Los autores, 2013.

Ilustración 130 Coordinación curva de protección a Tierra del relé SR469.



Fuente: Los autores, 2013.

4.7 Resultados de protección de elementos de voltaje en relé General Electric SR469.

4.7.1 Protección de bajo voltaje (27).

Se ajustaron las protecciones para bajo voltaje en el motor síncrono tanto para el arranque como para el funcionamiento normal de marchando.

Todos estos ajustes fueron tomados como base las definiciones dadas por el estándar IEEE 1159 del año 2009, que define para variaciones momentáneas la caída de tensión (sag) en valores por debajo del 90% de la tensión a un tiempo de duración de 3 segundos a 1 minuto.

Ilustración 131 Ajuste protección por baja tensión en relé SR469.

Undervoltage	
SETTING	PARAMETER
Undervoltage Active Only If Bus Energized	On/Yes
Undervoltage Alarm	Off
Undervoltage Trip	Latched
Undervoltage Trip Mode	3-Phase
Undervoltage Trip Relays	Trip
Undervoltage Trip Pickup	0.85 Rated
Starting Undervoltage Trip Pickup	0.60 Rated
Undervoltage Trip Delay	3.0 s

Fuente: Los autores, 2013.

4.7.2 Protección de Frecuencia (81).

La protección por frecuencia fue ajustada en el relé General Electric SR469 de acuerdo al esquema de alivio de carga definido por la planta Holcim, que dispone la secuencia de retirar carga del sistema debido a una baja frecuencia.

Tabla 17 Tabla esquema alivio de carga Holcim.

ESQUEMA DE ALIVIO DE CARGA POR BAJA FRECUENCIA						
PASO	FRECUENCIA (HZ)	TIEMPO ACTUACION (CICLOS)	EQUIPO QUE DESCONECTA	PORCENTAJE DE DESCONEXION DE CARGA		
				DESCONEXION DE CARGA (KW)	DESCONEXION DE CARGA (%)	DESCONEXION ACUMULADA DE CARGA (%)
1	59.4	12	MOLINO DE BOLAS DE CRUDO	2900	8.29	8.29
2	59.2	12	MOLINO VERTICAL DE CRUDO	4000	11.43	19.71
3	59.1	12	VENT. 361-VE4	3500	10	29.71
4	59	12	MOLINO CTO 3	3000	8.57	38.29
5	58.8	12	MOLINO CTO 2	3500	10	48.29
6	58.6	12	MOLINO CTO 1	3500	10	58.29
7	58.4	12	MOLINO VERTICAL COQUE	1300	3.71	62

Fuente: Los autores, 2013.

Ilustración 132 Ajuste protección por baja frecuencia en relé SR469.

Frequency	
SETTING	PARAMETER
Voltage Frequency Alarm	Off
Voltage Frequency Trip	Latched
Voltage Frequency Trip Relays	Trip
Overfrequency Trip Level	60.50 Hz
Underfrequency Trip Level	59.40 Hz
Voltage Frequency Trip Delay	0.2 s

Fuente: Los autores, 2013.

4.8 Resultados de protección de arranque del motor en relé General Electric SR469.

4.8.1 Protección por secuencia incompleta (48).

La protección por secuencia incompleta fue programada, de acuerdo al tiempo que demora en caer por debajo de la curva de sobrecarga la corriente en el momento del arranque, definido en el bloque de parámetro del modelo térmico.

En el relé General Electric SR469 existe un bloque denominado aprender (learned), el cual se puede visualizar el registro de tiempo de aceleración del motor en el momento de arranque, y aproximadamente el resultado fue de 4 a 7 segundo de aceleración, lo cual fue programado un tiempo de 8 segundos para protección del motor.

Ilustración 133 Ajuste protección por aceleración en relé SR469.

Acceleration Timer	
SETTING	PARAMETER
Acceleration Timer Trip	Latched
Acceleration Timer Trip Relays	Trip & Aux2
Acceleration Timer from Start	8.0 s

Fuente: Los autores, 2013.

4.8.2 Protección por bloqueo de arranques múltiples.

La protección por bloqueo de arranques múltiples fue ajustada de acuerdo a la hoja de datos de características del motor síncrono, definida por el fabricante que especifica las restricciones de arranques en diferentes condiciones de temperatura para proteger el devanado del motor

Ilustración 134 Ajuste protección por bloqueo de arranque en relé SR469.

Jogging Block	
SETTING	PARAMETER
Jogging Block	On/Yes <input type="button" value="v"/>
Maximum Starts/Hour Permissible	2
Time Between Starts	30 min

Fuente: Los autores, 2013.

4.9 Resultados de protección de corriente del motor en relé General Electric SR469.

4.9.1 Protección por desbalance de corriente (46).

El ajuste de protección por desbalance de corriente, es programado en el relé SR469 bajo la razón de la secuencia negativa sobre la corriente de secuencia positiva si el motor está operando sobre una corriente mayor que la corriente nominal del motor.

Además fue considerado la norma IEEE C37.96 como referencia de ajuste y también el hecho de que el motor síncrono no tiene el mismo grupo de bobina en cada polo, debido a que el motor a en toda su vida de funcionamiento ha sufrido cortos en bobinas y han sido retiradas por daño.

Ilustración 135 Ajuste protección por desbalance de corriente en relé SR469.

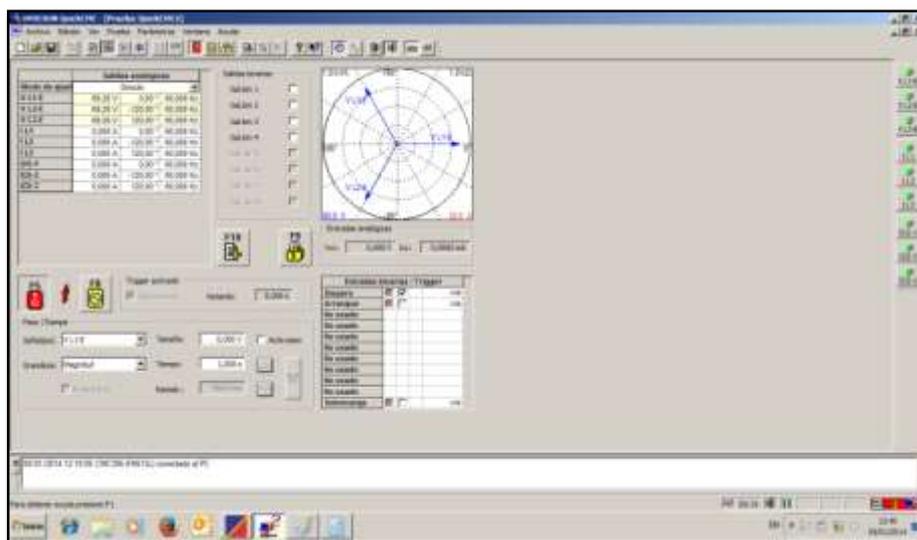
Current Unbalance	
SETTING	PARAMETER
Current Unbalance Alarm	Latched
Current Unbalance Alarm Relays	Alarm
Current Unbalance Alarm Pickup	15 %
Current Unbalance Alarm Delay	10 s
Current Unbalance Alarm Events	On/Yes
Current Unbalance Trip	Latched
Current Unbalance Trip Relays	Trip & Aux2
Current Unbalance Trip Pickup	20 %
Current Unbalance Trip Delay	4 s

Fuente: Los autores, 2013.

4.10 Prueba de simulación de fallas en relé SR469.

Primera prueba.- se ingresa el valor de voltajes de acuerdo a los PT que se están utilizando en el proyecto, en nuestro caso los PT's son de 35/1. Deberíamos inyectar 120 voltios por línea pero la conexión es delta abierto tenemos que $120/\sqrt{3} = 69.28$ voltios línea-neutro.

Ilustración 136 Inyección de voltaje a través del software.



Fuente: Los autores, 2014.

Obteniendo como resultado en el relé de protección la siguiente lectura de 4200 como voltaje máximo. Ya que el voltaje de placa es de 4160 voltios.

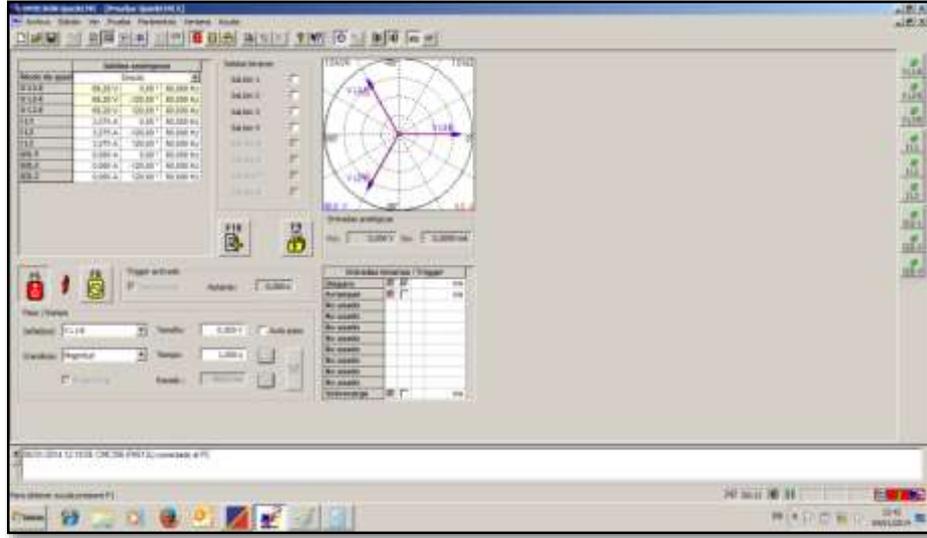
Imagen 14 Lectura de voltaje en relé de protección.



Fuente: Los autores, 2014.

Ahora procedemos a ingresar los valores de corrientes, nuestros CT's son de 600/5A por lo que el valor a inyectar en el relé es de 3.275 A que en corriente real vendría a dar 393 A que es la corriente nominal de placa del motor síncrono.

Ilustración 137 Inyección de corriente a través del software.



Fuente: Los autores, 2014.

Obteniendo el resultado de lectura de corriente de las tres fases en el relé de protección.

Imagen 15 Lectura de corrientes en relé de protección.

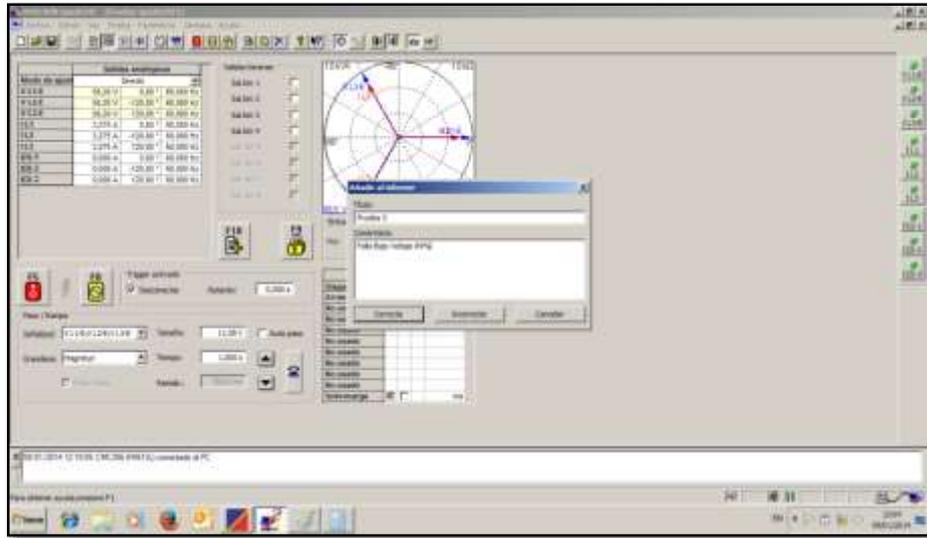


Fuente: Los autores, 2014.

La siguiente prueba que se realizó fue la de bajo voltaje, esto quiere decir que del voltaje nominal el relé de protección activara el contacto de salida, según nuestro análisis debe ser 15% por debajo del voltaje nominal.

Ejemplo 69,28 voltios es lo nominal se le resta el 16% que es 11,08 voltios dando un voltaje de 58,20 que es lo que debemos inyectar para simular la falla de bajo voltaje por lo que el relé dispara por debajo del 15%.

Ilustración 138 Inyección de bajo voltaje a través del software.



Fuente: Los autores, 2014.

En el relé de protección obtuvimos el siguiente diagnóstico.

Imagen 16 Mensaje de bajo voltaje en relé de protección.

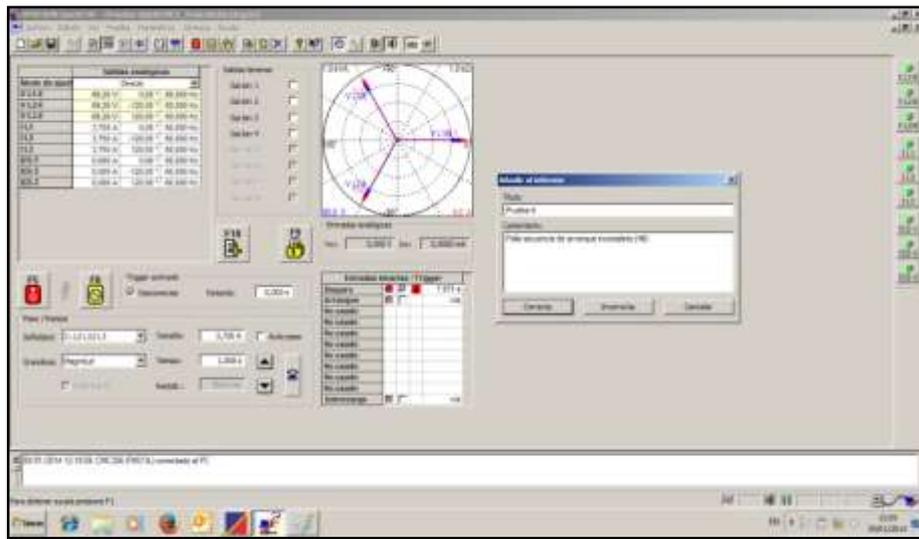


Fuente: Los autores, 2014.

La prueba de secuencia incompleta está dada por la curva de arranque del motor que se demora lleva 10 segundos en completar la secuencia de marcha, donde de 1000 amperios baja hasta 20 amperios. Por lo que hemos configurado que si no baja de los 393 amperios de placa durante 8 segundos el relé dispara por secuencia incompleta.

Para esta prueba inyectamos 3,75 amperios que en corriente real debe dar 450 amperios que es superior a los 393 amperios de placa.

Ilustración 139 Inyección de sobrecorriente para secuencia incompleta.



Fuente: Los autores, 2014.

Obteniendo como resultado en pantalla del relé de protección luego de los 8 segundos el siguiente mensaje.

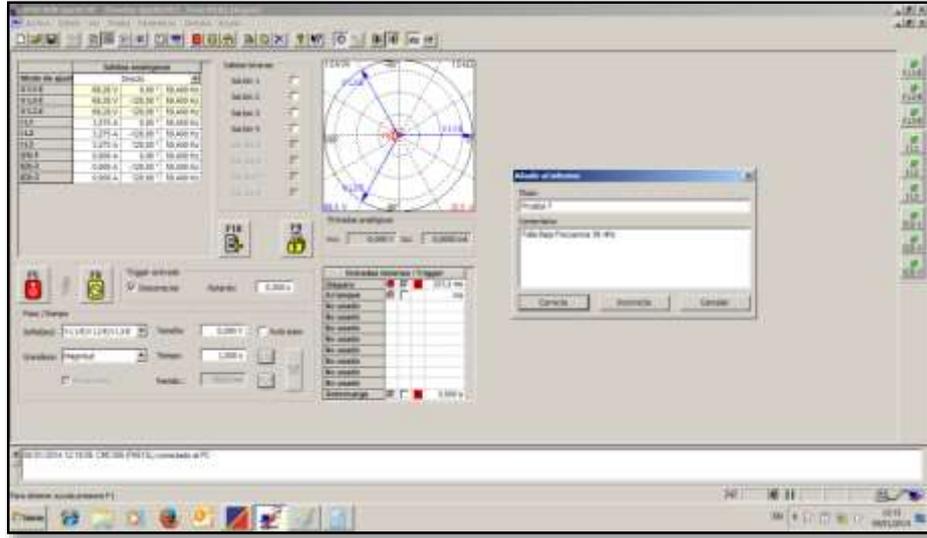
Imagen 17 Mensaje de aceleración como secuencia incompleta.



Fuente: Los autores, 2014.

La prueba de baja frecuencia se programa de acuerdo a un sistema de alivio de carga (ver tabla) para nuestro equipo la frecuencia con la que el relé disparara es de 59,4Hz.

Ilustración 140 Inyección de baja frecuencia a través del software.



Fuente: Los autores, 2014.

Obteniendo el siguiente mensaje en la pantalla del relé de protección.

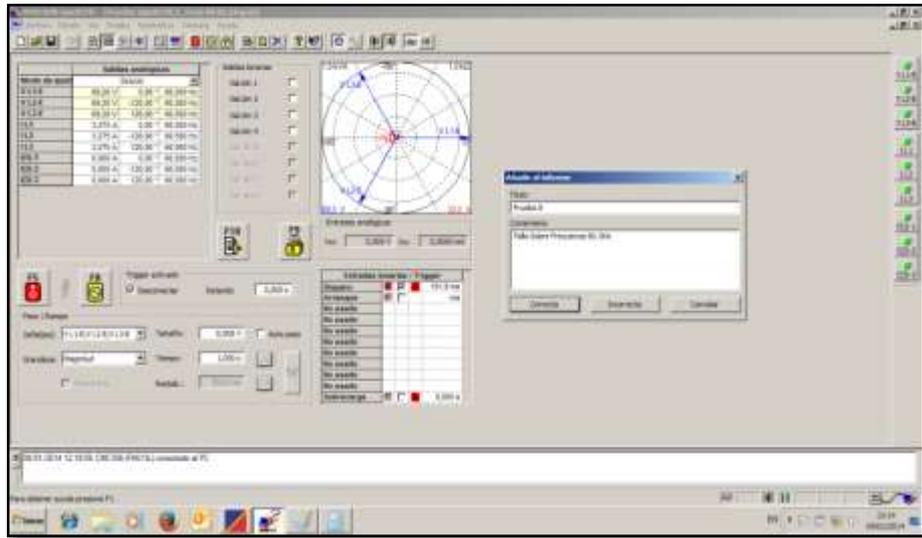
Imagen 18 Mensaje de baja frecuencia en relé de protección.



Fuente: Los autores, 2014.

La simulación de alta frecuencia se realizó del mismo modo que la prueba de baja frecuencia se aumentó en la salida de frecuencia a un valor superior a los 60 Hertz, en nuestro caso fue 60,5 Hertz.

Ilustración 141 Inyección de alta frecuencia a través del software.



Fuente: Los autores, 2014.

En el relé de protección obtuvimos un mensaje de alarma después del disparo.

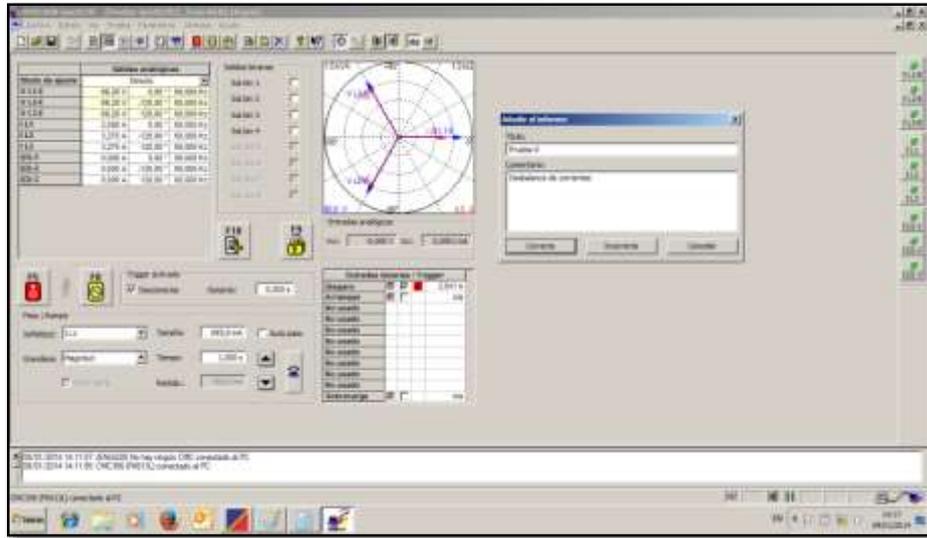
Imagen 19 Mensaje de alta frecuencia en relé de protección.



Fuente: Los autores, 2014.

En la prueba de desbalance de corrientes, tuvimos que bajar el valor de una de las corrientes para simular el desbalance menor al 20% por lo que el valor usado fue 2.58 Amperios.

Ilustración 142 Inyección de corriente desbalanceada a través del software.



Fuente: Los autores, 2014.

En el relé de protección además de dispararse obtuvimos el mensaje de alarma.

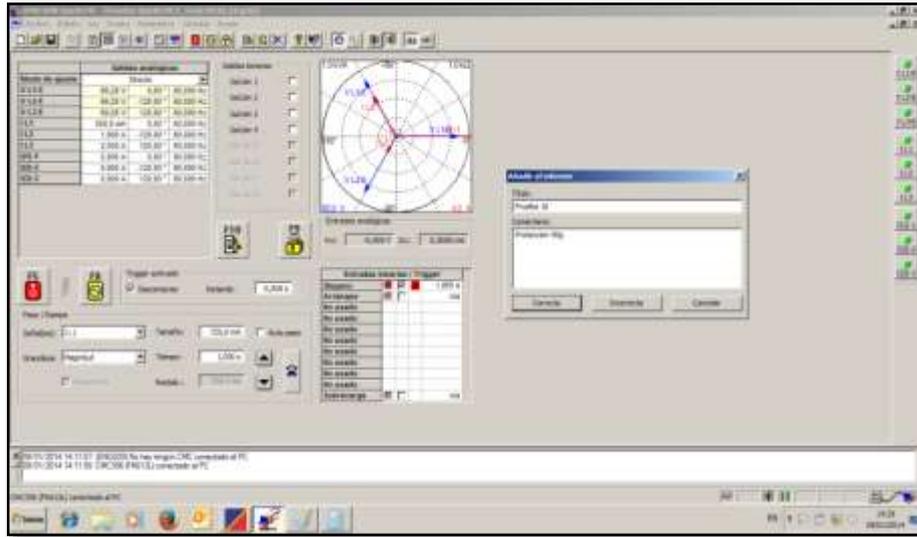
Imagen 20 Mensaje de desbalance de corriente en el relé de protección.



Fuente: Los autores, 2014.

La prueba de protección de corriente a tierra, se realizó simulando el desbalance de las 3 corrientes para obtener una corriente circulante por la tierra para el disparo del relé.

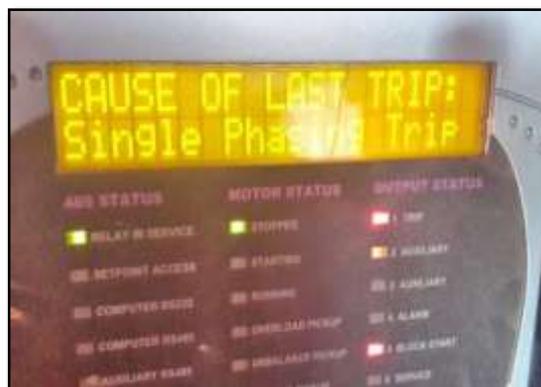
Ilustración 143 Inyección de corrientes desbalanceadas para prueba de protección a tierra.



Fuente: Los autores, 2014.

En el relé de protección obtenemos el mensaje por disparo de la protección 50G.

Imagen 21 Mensaje de protección a tierra en relé de protección.



Fuente: Los autores, 2014.

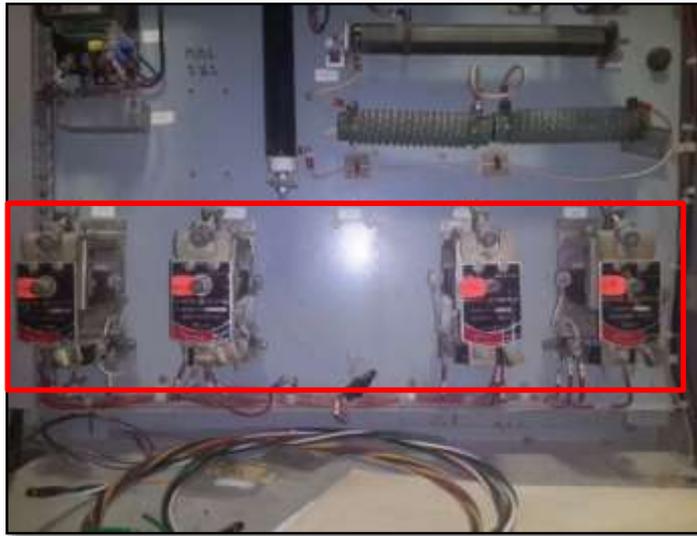
4.11 Resultado de modificación de control del arrancador motor molino bolas de Crudo.

Como se mencionó en el capítulo 3, la modificación del control de arrancador del motor del molino, fue necesaria, debido al relé SR469 cumple u obtiene todas estas funciones en un solo equipo, además de su antigüedad estos relés removidos, no han

obtenido mantención de calibración y verificación de disparos durante mucho tiempo.

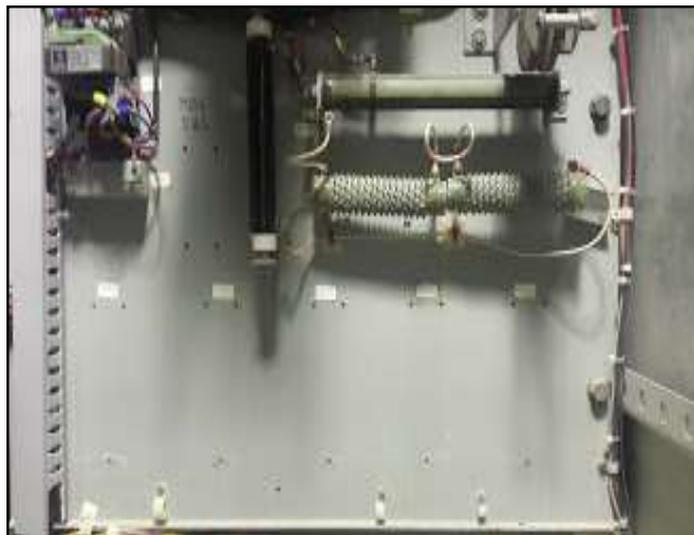
A continuación se detalla en las siguientes ilustraciones, el resultado de las modificaciones realizadas en el arrancador.

Ilustración 144 Relé diferencial obsoleto (antes).



Fuente: Los autores, 2014.

Ilustración 145 Relé diferencial obsoleto (eliminado).



Fuente: Los autores, 2014.

Ilustración 146 Medición de potencia y temperatura (antes).



Fuente: Los autores, 2014.

Ilustración 147 Medición de potencia y temperatura (ahora).



Fuente: Los autores, 2014.

La medición de temperatura del devanado del estator del motor síncrono se eliminó del controlador omega en el arrancador, y se cableo dicha señal al relé SR469 para medición y control del motor.

Ilustración 148 Relé de Frecuencia, bajo voltaje, MP3000 (antes).



Fuente: Los autores, 2014.

Ilustración 149 Relé de Frecuencia, bajo voltaje, MP3000 (ahora).



Fuente: Los autores, 2014.

Es necesario tomar en consideración al momento del retiro de los equipos antes mencionados, no perder la secuencia serie de las corrientes que pasan por las diferentes equipos obsoletos retirados antes mencionado, debido a que se puede producir una pérdida de fase en los otros equipos de medición de energía (ION 7300).

Luego de la modificación y la adición de la salida digital de disparo de falla del SR469 al control del arrancador del motor síncrono, se verifica la señal “listo” del relé R1 si llega al sistema de control Pcs7, una vez confirmada su señal, significa que el contacto del relé SR469 y la cadena de control están cableadas correctamente.

Ilustración 150131 Relés de protección del motor síncrono (antes).



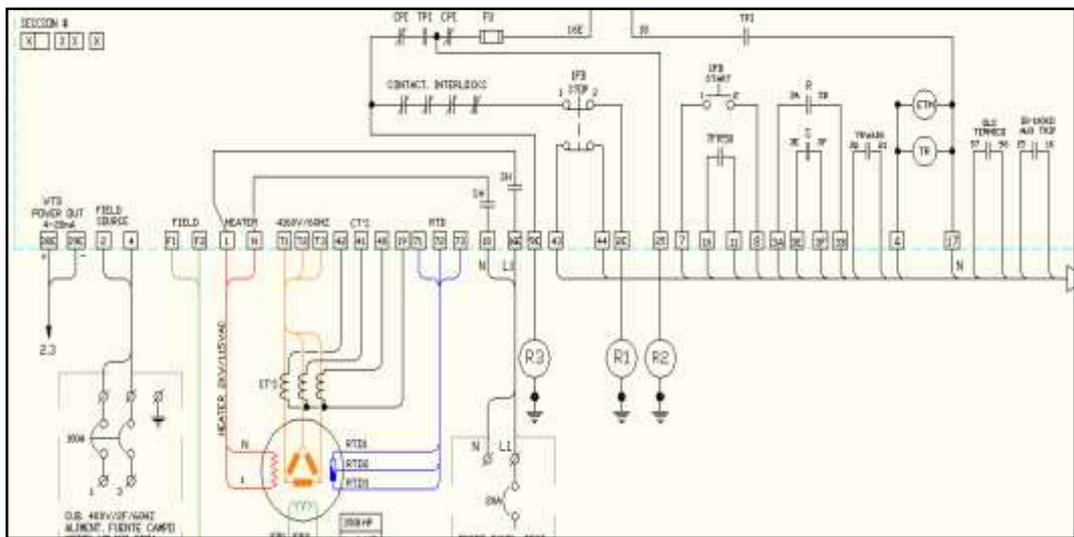
Fuente: Los autores, 2014.

Ilustración 151 Relés de protección del motor síncrono (ahora).



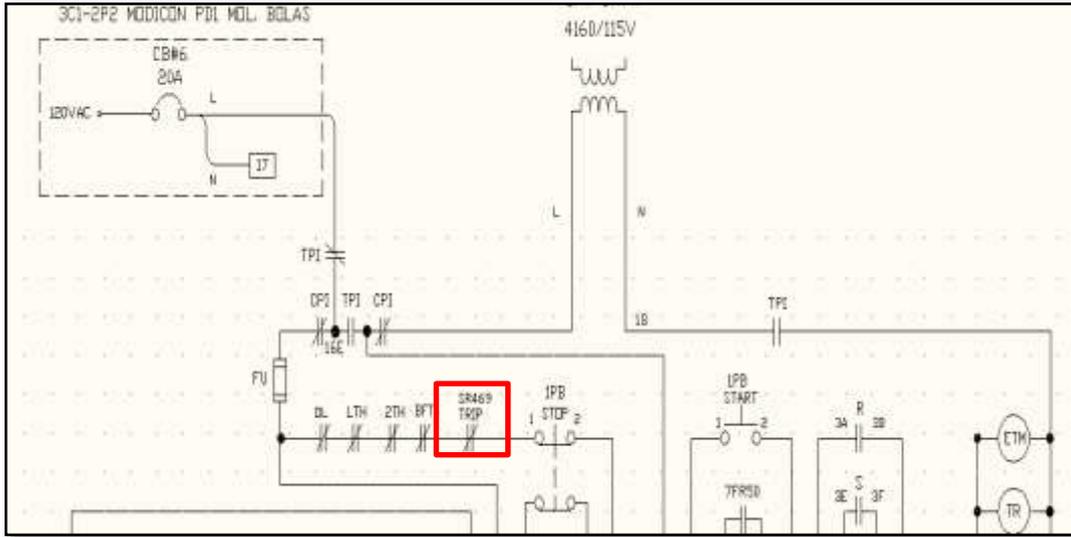
Fuente: Los autores, 2014.

Ilustración 152 Control relé R1 (listo) señal de control de parada molino (antes).



Fuente: Holcim-Ecuador, 2014.

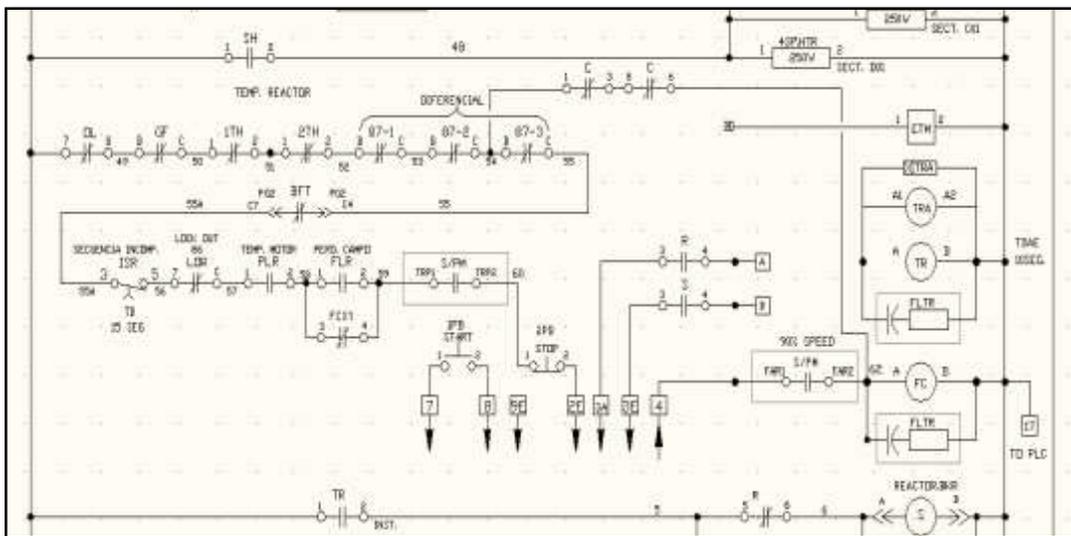
Ilustración 153 Control relé R1 (listo) señal de control de parada molino (ahora).



Fuente: Holcim-Ecuador, 2014.

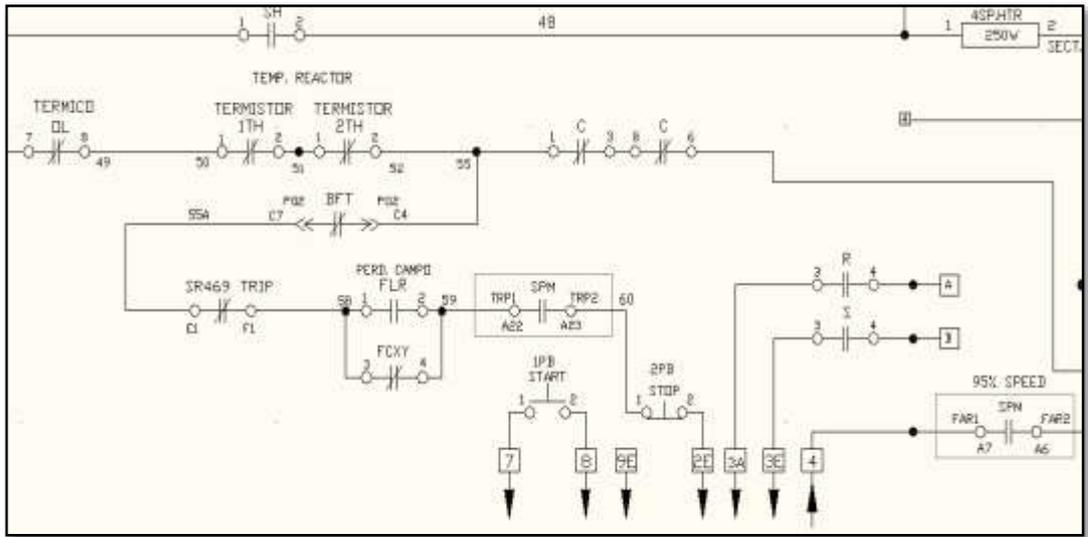
Se modificó el control de arranque del motor, se eliminaron las señales de los relés antiguos y se adicióno la señal del nuevo relé SR469, quedando como principal proteccion antes un evento de falla en el equipo.

Ilustración 154 Control de parada del motor síncrono más detallado (antes).



Fuente: Holcim-Ecuador, 2014.

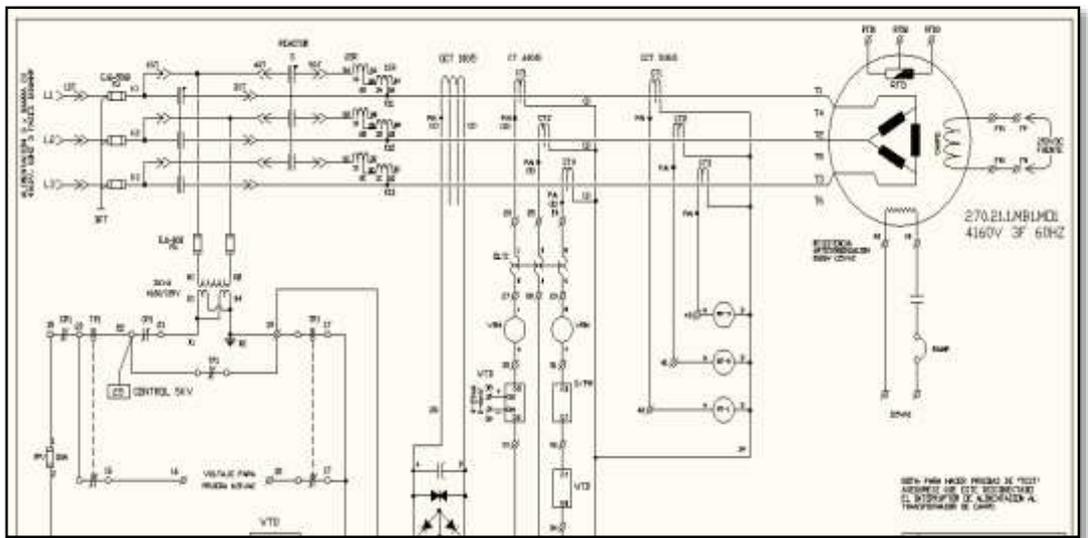
Ilustración 155 Control de parada del motor síncrono más detallado (ahora).



Fuente: Holcim-Ecuador, 2014.

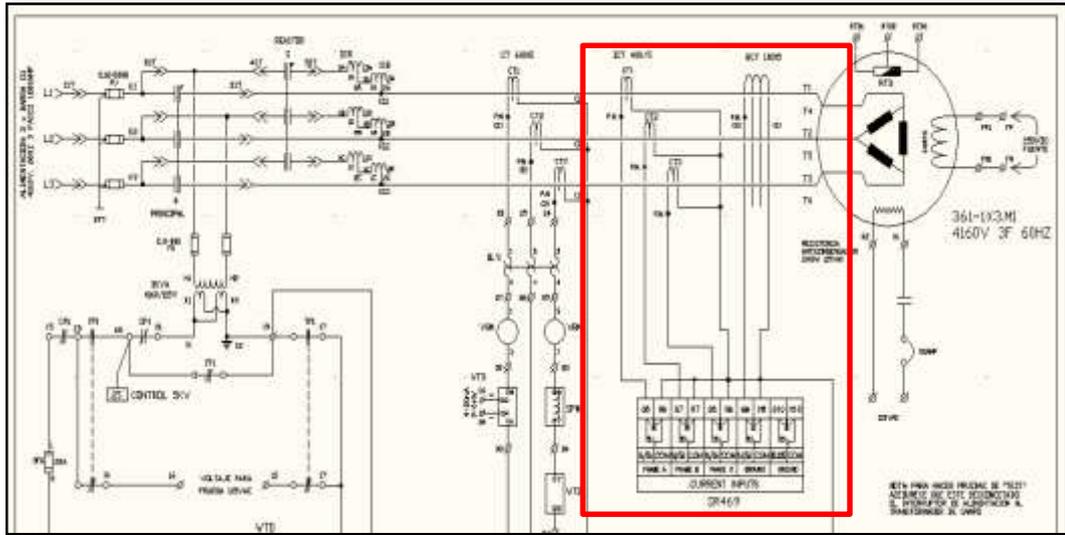
Se adiciono la señal de nuevo relé SR469 al control del arrancador del molino, y se removi6 todas las se~ales de los antiguos relés obsoletos, quedando únicamente, los termistores del reactor, el contacto de fusible abierto y el contacto del relé térmico.

Ilustración 156 Sistema de protección y medición de Corriente (antes).



Fuente: Holcim-Ecuador, 2014.

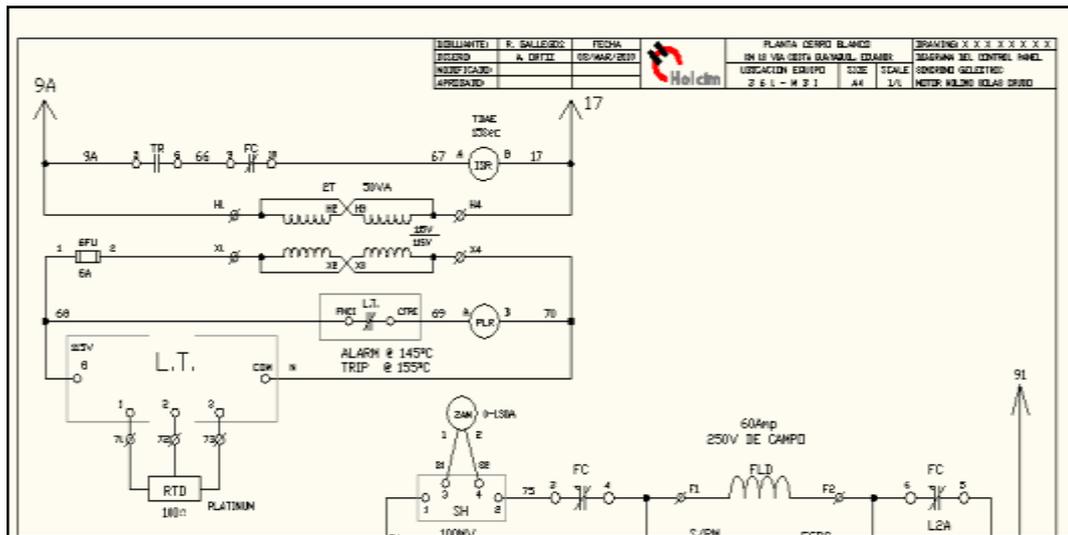
Ilustración 157 Sistema de protección y medición de Corriente (ahora).



Fuente: Holcim-Ecuador, 2014.

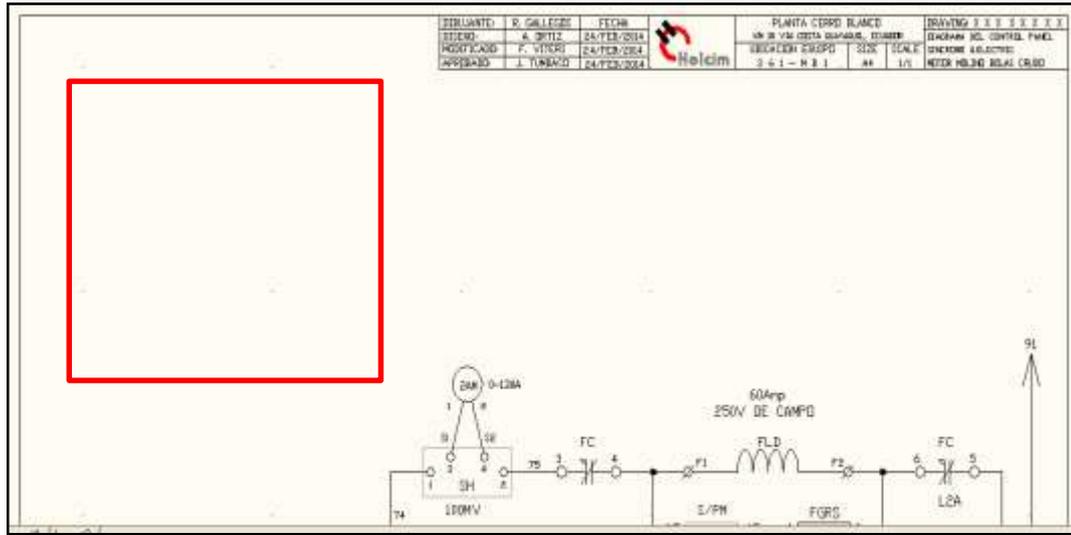
Para la medición y protección en el relé SR469, se instaló nuevos transformadores de corriente, de relación de 400 a 5 amperios, y para protección de tierra se instaló un transformador de corriente de 100 a 5 amperios. El motivo de la instalaciones de los nuevos transformadores fue la de independizar el sistema de medición con el sistema de protección en el motor síncrono.

Ilustración 158 Control de secuencia incompleta (antes).



Fuente: Holcim-Ecuador, 2014.

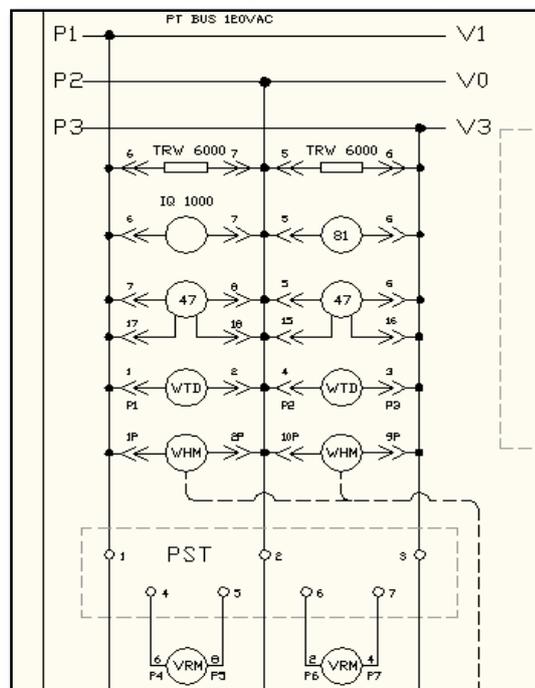
Ilustración 159 Control de secuencia incompleta (ahora).



Fuente: Holcim-Ecuador, 2014.

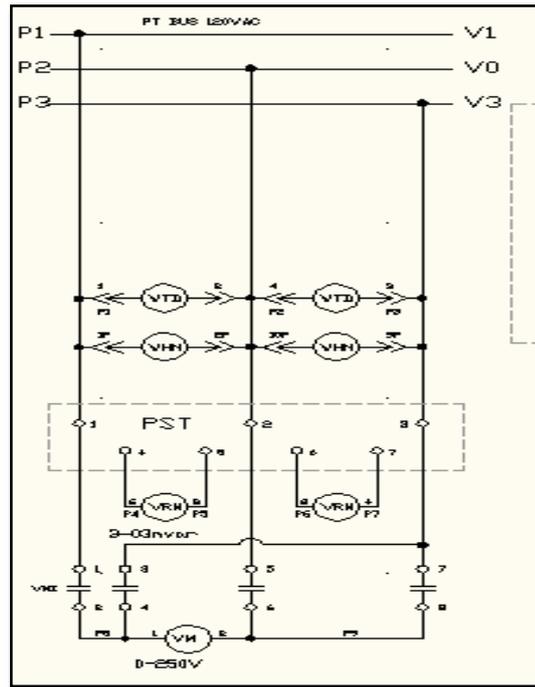
Se eliminó el control de secuencia incompleta del arrancador del motor, debido a que el relé SR469, integra esta función de protección, y fue configurada para proteger al equipo debido a una falla de secuencia incompleta.

Ilustración 160 Medición para protección de baja frecuencia (antes).



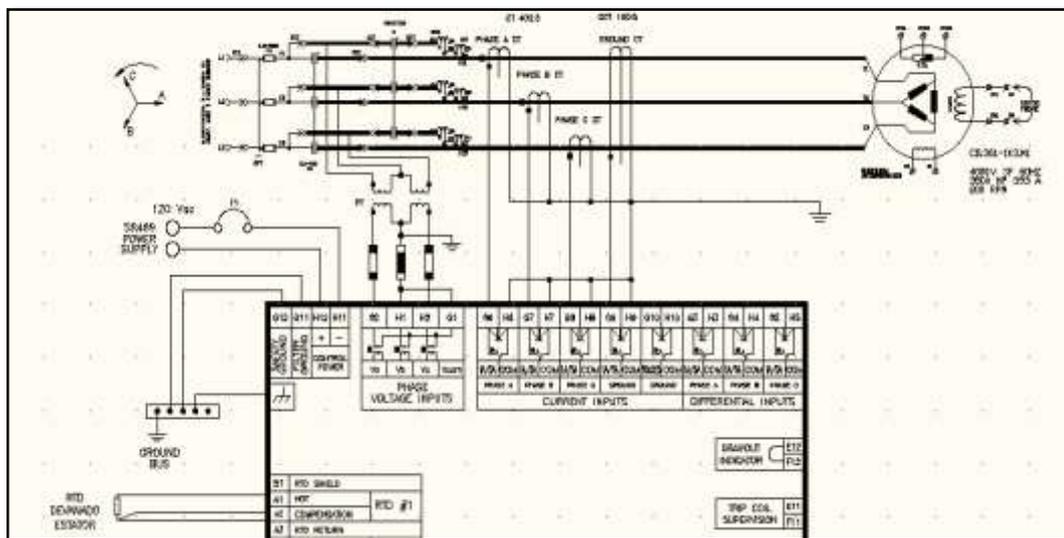
Fuente: Holcim-Ecuador, 2014.

Ilustración 161 Medición para protección de baja frecuencia (ahora).



Fuente: Holcim-Ecuador, 2014.

Ilustración 162 Conexión de elementos a tornillería del relé SR469.²⁵



Fuente: Holcim-Ecuador, 2014.

²⁵ Se puede visualizar en el anexo A la ilustración para su mayor entendimiento.

Todos los cables instalados fueron etiquetados y conectados con terminales respectivos para el conexionado a la tornillería del relé SR469 como lo exige Holcim.

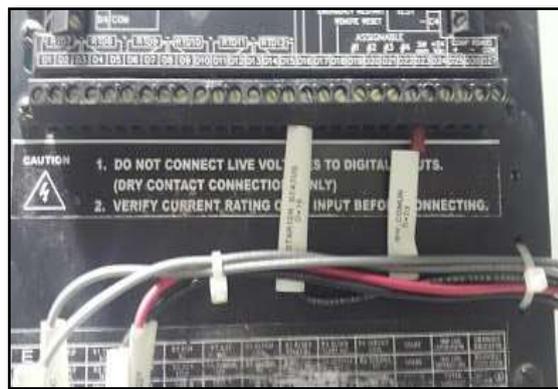
La señal del contactor principal del motor síncrono, que determina que la secuencia de arranque ha terminado y que a su vez al mismo tiempo desconecta el reactor ,fue cableado al relé SR469 como protección de secuencia incompleta.

Ilustración 163 Conexionado del relé SR469.



Fuente: Los autores, 2014.

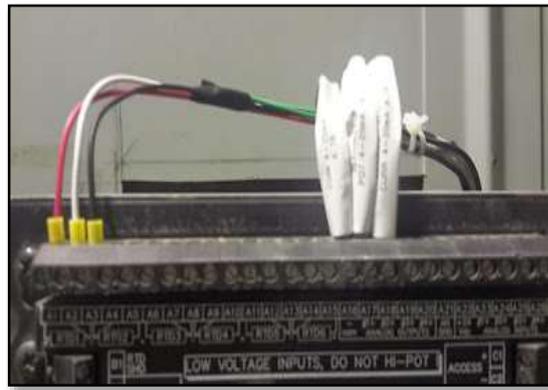
Ilustración 164 Conexionado de señal contactor principal motor síncrono.



Fuente: Los autores, 2014.

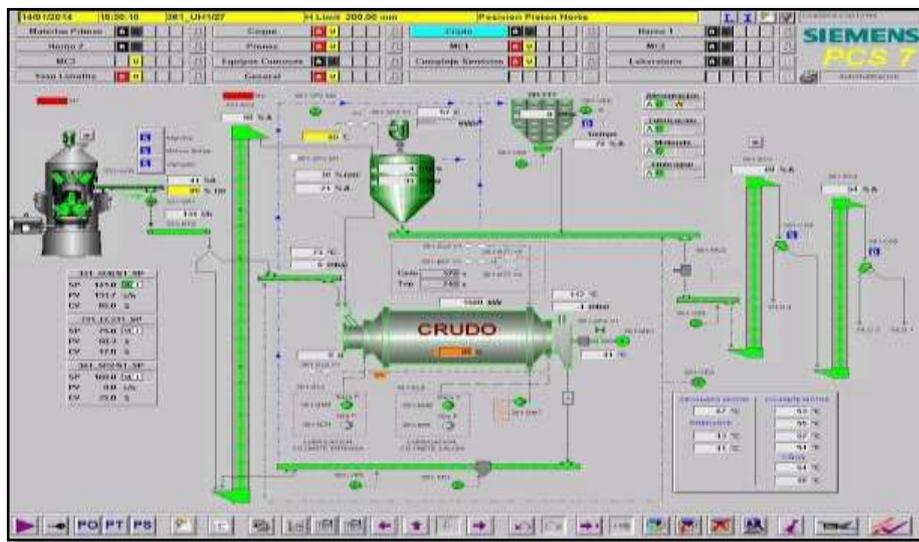
Las señales de Potencia y carga del motor síncrono del molino fueron programadas como salidas análogas en el relé SR469 y cableadas al sistema de control de proceso Holcim (PCS7), para que los operarios de control central que operan esta área puedan visualizar tales variables y tomar decisiones en base a ellas.

Ilustración 165 conexionado de señal de Potencia y carga del motor síncrono.



Fuente: Los Autores, 2014.

Ilustración 166 Pantalla de visualización y control del molino de bolas del área de Crudo (antes).



Fuente: Holcim-Ecuador, 2014.

Una vez finalizado las modificaciones en el control del arrancador, y realizado el conexionado del nuevo relé de protección SR469, programado sus protecciones, simulado fallas programadas, se procedió como último paso a poner en

funcionamiento el relé quedando como protección principal del motor del molino de bolas de Crudo.

Ilustración 167 Puesta en funcionamiento relé SR469.



Fuente: Los autores, 2014.



CAPITULO V

CAPÍTULO V

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

En este capítulo mencionaremos las conclusiones y recomendaciones necesarias para el buen funcionamiento del sistema de protección eléctrica del motor síncrono, tanto sus ajustes de protección en el relé SR469, como también la coordinación aguas arribas como protección secundaria del relé.

5.1 Conclusión de la curva de arranque del motor síncrono.

Es muy importante señalar el buen ajuste de la protección de secuencia incompleta del motor en el nuevo relé General Electric SR469, debido a que un mal ajuste de tiempo en este parámetro ocasionará disminución de la vida útil del motor por efecto de calentamiento en los devanados del motor en un evento de atascamiento en el arranque.

5.2 Conclusión de la instalación del nuevo relé General Electric SR469.

La instalación del nuevo relé General Electric SR469 que brindará protección al motor síncrono, fue necesaria implementarla debido a la mala protección brindada por el actual relé instalado en el equipo, ya que si bien es un relé electrónico digital microprocesador y que brindaría similar protección como lo brinda el nuevo relé a instalar, uno de los motivos por la cual se decidió reemplazarlo fue debido a que en otras áreas de la planta Holcim existen también motores síncronos en molinos de bolas de Cemento y es necesario cumplir con el estándar dado por la empresa.

El actual relé electrónico digital fue implementado de improviso debido a que en marzo del 2013, se produjo una falla en el arrancador del motor y las antiguas protecciones no dispararon en el instante de la falla, por lo consiguiente se necesitó reemplazar las protecciones con el nuevo relé General Electric SR469 pero no había

repuesto en stock de almacén y fue necesario reemplazarlo por un relé que si disponía almacén en stock.

Para la programación del nuevo relé es necesario tomar en consideración lo siguiente:

- Si bien el relé ofrece muchas funciones de protección es necesario ajustar las protecciones adecuadas que se adapten al motor síncrono.
- Verificar si las protecciones habilitadas en el relé, deberían hacer control abriendo el contactor en el momento de una falla. Por ejemplo, en una falla de sobrecorriente instantánea, la protección (50) no debería actuar y abrir el contactor por lo que este equipo no tiene la capacidad de interrupción de despejar fallas a magnitudes de corrientes muy altas.
- Revisar las conexiones de los transformadores de corriente, debido a una mala polarización puede existir una mala medición.
- Ajustar adecuadamente la conexión de los transformadores de potencia y ajusta su debida configuración de conexión en el relé.
- Verificar el correcto desfase tensión-corriente, debido a una inversión de fase puede existir un disparo no deseado de las protecciones del relé (desbalance de corriente).

5.3 Recomendaciones para la programación del relé General Electric SR469.

Una de las recomendaciones importantes para los ajustes de protección del motor síncrono a proteger, es ajustar en el nuevo relé General Electric SR469, los ajustes necesarios e importantes que se adapten al motor síncrono, sin comprometer con los equipos que componen el arrancador del motor. Es decir no es una buena práctica ajustar la protección de sobrecorriente instantánea de fase (50), cuando el equipo que va hacer actuar la protección sea un contactor, debido a que el contactor no tiene la capacidad de interrupción para despejar fallas de magnitudes de corrientes muy altas.

5.4 Conclusión protección diferencial (87) en el nuevo relé General Electric SR469.

La protección diferencial, es una protección de primera línea para fallas en el motor, si bien es una protección importante para el equipo, se debe tener cuidado al momento de habilitar, debido a que el aparato de interrupción, no tiene la capacidad de despejar fallas de corrientes de magnitudes altas, el contactor o interruptor puede tener daños perjudiciales.

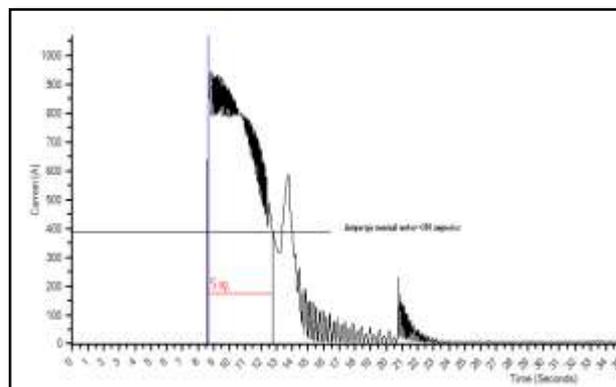
Debido a que en el arrancador del motor, existe un contactor que alimenta al motor síncrono, y dicho contactor no tiene la capacidad de interrupción, esta función de protección diferencial ha sido deshabilitada.

5.5 Recomendación de ajuste de la protección de secuencia incompleta (46).

Como se mencionó anteriormente, este parámetro de ajuste es muy importante, por las consecuencias que conlleva a un mal ajuste en el tiempo.

Un ajuste ideal de tiempo de aceleración, nos dio la curva de arranque del motor síncrono, grafica proporcionada por el equipo Pdma Emax, dando como resultado un óptimo ajuste de 8 segundos, este tiempo significa que la corriente de arranque cae por debajo de la corriente nominal de placa del motor.

Ilustración 168 Tiempo de ajuste protección secuencia incompleta.



Fuente: Los autores, 2013.

5.6 Conclusión protección sobrecorriente (50) en el nuevo relé General Electric SR469.

Esta protección de sobrecorriente instantánea fue deshabilitada en el nuevo relé, debido a la misma conclusión de la protección diferencia, el contactor que alimenta el motor síncrono ,no tiene la capacidad de interrupción para fallas de magnitudes de corrientes muy altas.

5.7 Recomendaciones para la puesta en servicio del relé General Electric SR469.

Es necesario antes de la puesta en servicio del nuevo relé para protección del motor, realizar algunos cambios de en la configuración del relé aguas arriba que sirve de protección secundaria para el motor síncrono denominado CBE21-1S2 para garantizar mejor la coordinación entre ambos relés.

A continuación se detalla la nueva configuración ajustada al relé ubicado en la subestación principal que sirve de protección del alimentador de la subestación eléctrica de Crudo1.

Tabla 18 Ajuste protección relé Digitrip3000 (actual).

LOCATION	CODIGO HAC	DESCRIPCION	RELE	MARCA	MODELO	CT RATIO	DEVICE NUMBER	PICKUP(AMP)			INST.PICKUP(AMP)		
								CURVA	PICKUP(pu)	TIME DIAL	CURVA	PICKUP(pu)	TIME DIAL
S/E PCPAL	CB.E21-1S2	ALIM.MOLINO CRUDO 1	R3	CUTLER HAMMER	DIGITRIP 3000	1200/5	51	IT	0,5	5			
							50				IT	1	1,5
							50				IT	3	XX
						50/5	51G	IT	0,2	3			
							50G				IT	0,75	1
							50G				IT	1	XX

Fuente: Los autores, 2013.

Tabla 19 Ajuste protección relé Digitrip3000 (futuro).

LOCATION	CODIGO HAC	DESCRIPCION	RELE	MARCA	MODELO	CT RATIO	DEVICE NUMBER	PICKUP(AMP)			INST.PICKUP(AMP)		
								CURVA	PICKUP(pu)	TIME DIAL	CURVA	PICKUP(pu)	TIME DIAL
S/E PCPAL	CB.E21-1S2	ALIM.MOLINO CRUDO 1	R3	CUTLER HAMMER	DIGITRIP 3000	1200/5	51	XTRM	2	2			
							50				XTRM	4	0,5
							50				XTRM	4	0,5
						50/5	51G	IT	0,2	3			
							50G				IT	0,75	0,45
							50G				IT	0,75	0,45

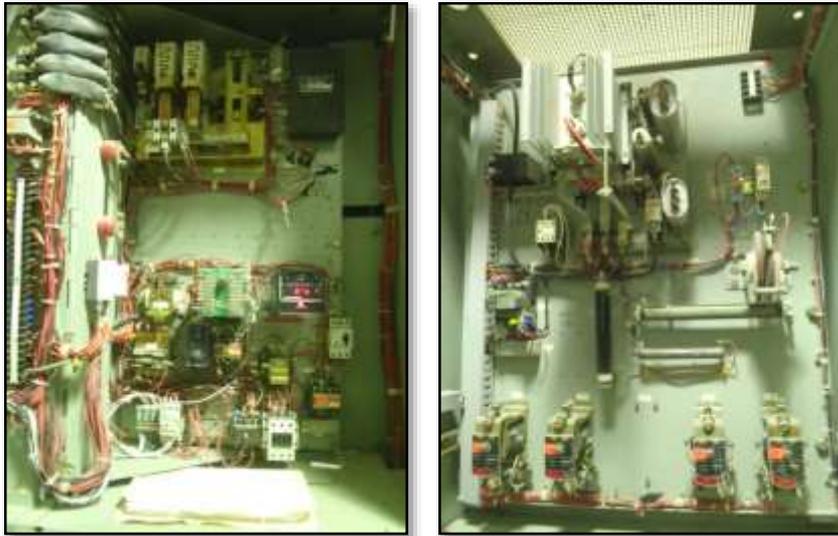
Fuente: Los autores, 2013.

5.8 Recomendaciones de confiabilidad en el arrancador del motor síncrono.

La confiabilidad de un equipo es muy importante para la continua producción de línea de una planta industrial en todo su proceso, por tal motivo, se hace especial referencia en la confiabilidad que presenta cada uno de los elementos que conforma el arrancador del motor síncrono del molino de bola de Crudo de la planta Holcim.

En eventos pasados en el año 2013 , hubo algunas paradas debido al mal funcionamiento de elementos del arrancador, adicionalmente la mayoría de elementos principales que los conforma ,como son el contactor de campo de corriente directa presenta muchos años de servicio , sumado a una tecnología antigua ,existe un riesgo potencia de fallo del equipo, por aquello es necesario realizar una actualización del arrancador del molino de bolas de Crudo llegando a modernizarlo como lo tiene el arrancador del molino de bolas de Cemento .

Imagen 22 Control arrancador motor síncrono (actual).



Fuente: Los autores, 2013.

5.9 Recomendaciones de revisión del relé General Electric SR469.

El propósito de la revisión periódica es realizar una prueba funcional completa de la electrónica del relé y así asegurar la confiabilidad del equipo de trabajar correctamente ante un evento de fallo en el elemento o equipo a proteger.

Estas pruebas se basan en las recomendaciones dadas por el fabricante y se las puede encontrar en el manual del relé General eléctrica SR469.

Estas pruebas se describen a continuación:

Prueba funcional de hardware.

- Prueba de corriente.
- Prueba de precisión de entrada de voltaje.
- Prueba de precisión de diferencial y tierra.
- Prueba de precisión de RTD.
- Prueba de entradas y salidas digitales.
- Prueba de bobina de disparos.
- Prueba de señales análogas.

Ilustración 169 Prueba de precisión de entrada de voltaje.

VOLTAJE DE LINEA-NEUTRO APLICADO (V)	LECTURA VOLTAJE ESPERADA (V)	VOLTAJE MEDIDO A-N (V)	VOLTAJE MEDIDO B-N (V)	VOLTAJE MEDIDO C-N (V)
30	300			
50	500			
100	1000			
150	1500			
200	2000			
270	2700			

Fuente: manual General Electric SR469.

Es necesario incluir en el plan de mantenimiento preventivo de la planta, las pruebas antes descritas para garantizar la confiabilidad del equipo

Estas revisiones se pueden incluir en el MAC del mantenimiento preventivo anual del equipo CB361-MB1 que corresponde al molino de bolas de Crudo.

BIBLIOGRAFÍA

- FELIZ, J. (16 de 09 de 2009). Justificación y diseño de falsa protección diferencial de barras para S.E Cerro de la Plata. Madrid.
- GARCIA, H. (2013). *Maquinas Sincronas*. Instituto Tecnologico de la Costa Grande.
- General Electric. (2001). *GEH-3133A*.
- General Electric. (2012). *Rele de proteccion SR469*.
- Holcim-Ecuador. (2010). Proceso de fabricacion de Cemento. Guayaquil, Guayas, Ecuador.
- IEEE. (2000). IEEE Guide for AC Motor Protection.
- Applied Protective Relaying*, Coral Springs, FL: Westinghouse Electric Corporation, Relay and Tele- communications Division, 1982.
- Blackburn, J. L., *Protective Relaying, Principles and Applications*, New York: Marcel Dekker, Inc., 1987.
- Industrial Power Systems Data Book*, Schenectady, N.Y.: General Electric Company.
- Schmidt, R. A., "Calculation of Fault Currents for Internal Faults in AC Motors," *AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 75, pp. 818–824, October 1956.
- Love, D. J., "Ground Fault Protection for Electric Utility Generating Station Medium Voltage Auxiliary Power Systems," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-97, no.2, pp. 583–586, March/April 1978.

ANEXO A
DIAGRAMAS.

Plano control eléctrico motor molino de bolas de Crudo.

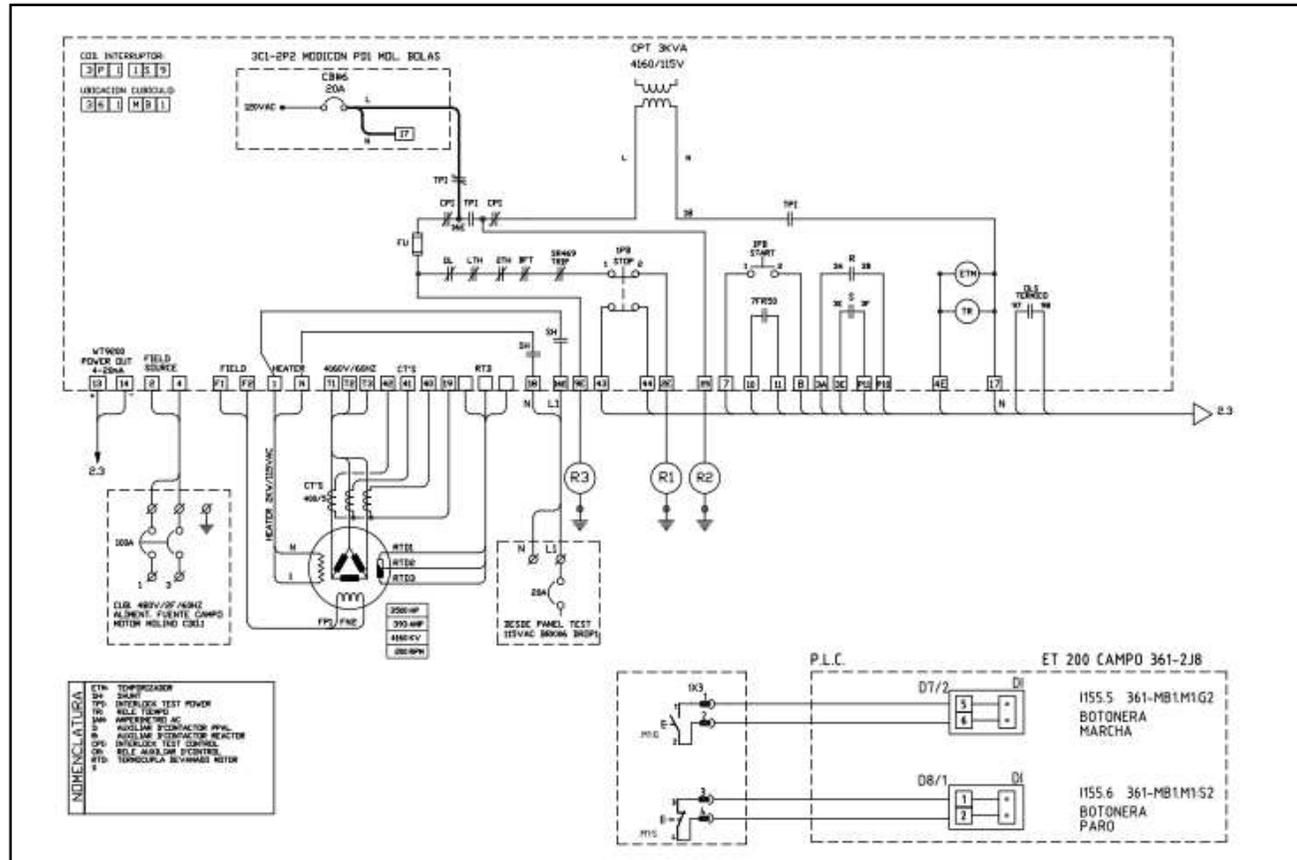


Diagrama típico de alambrado SR469

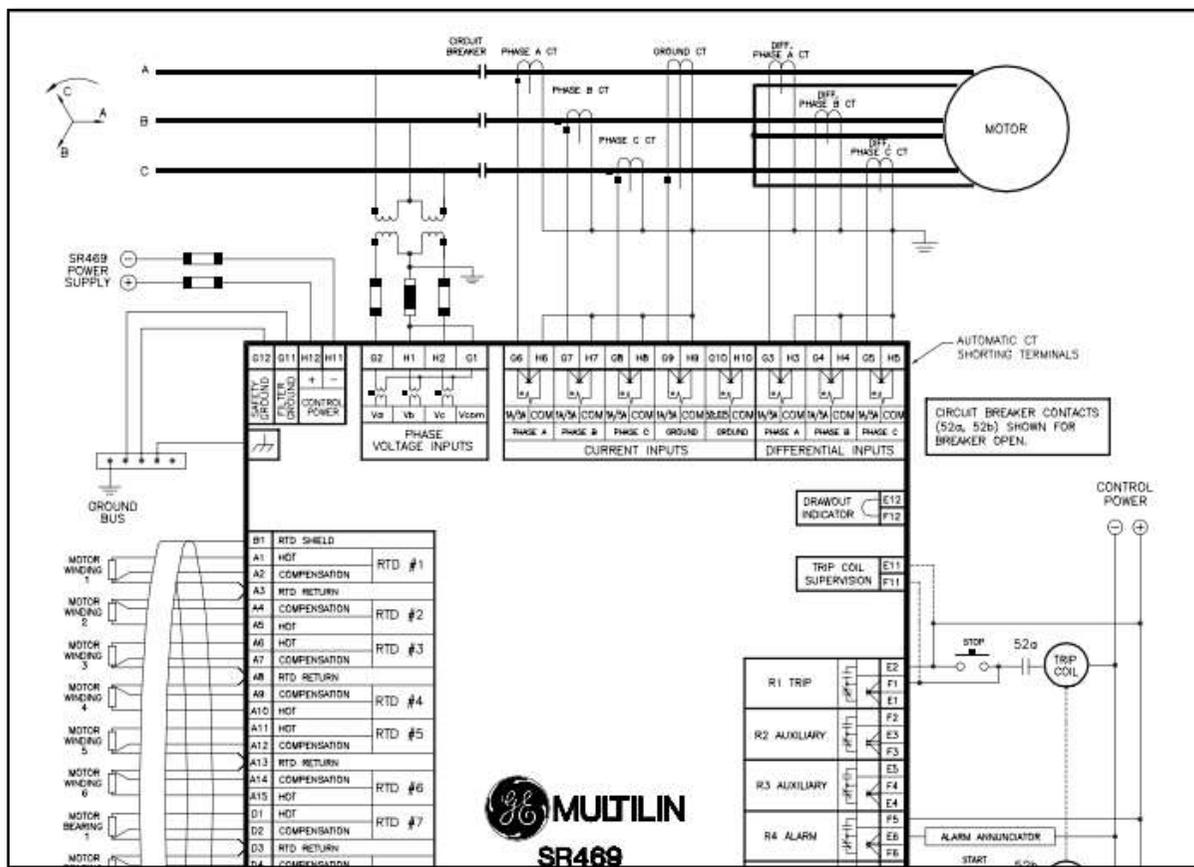
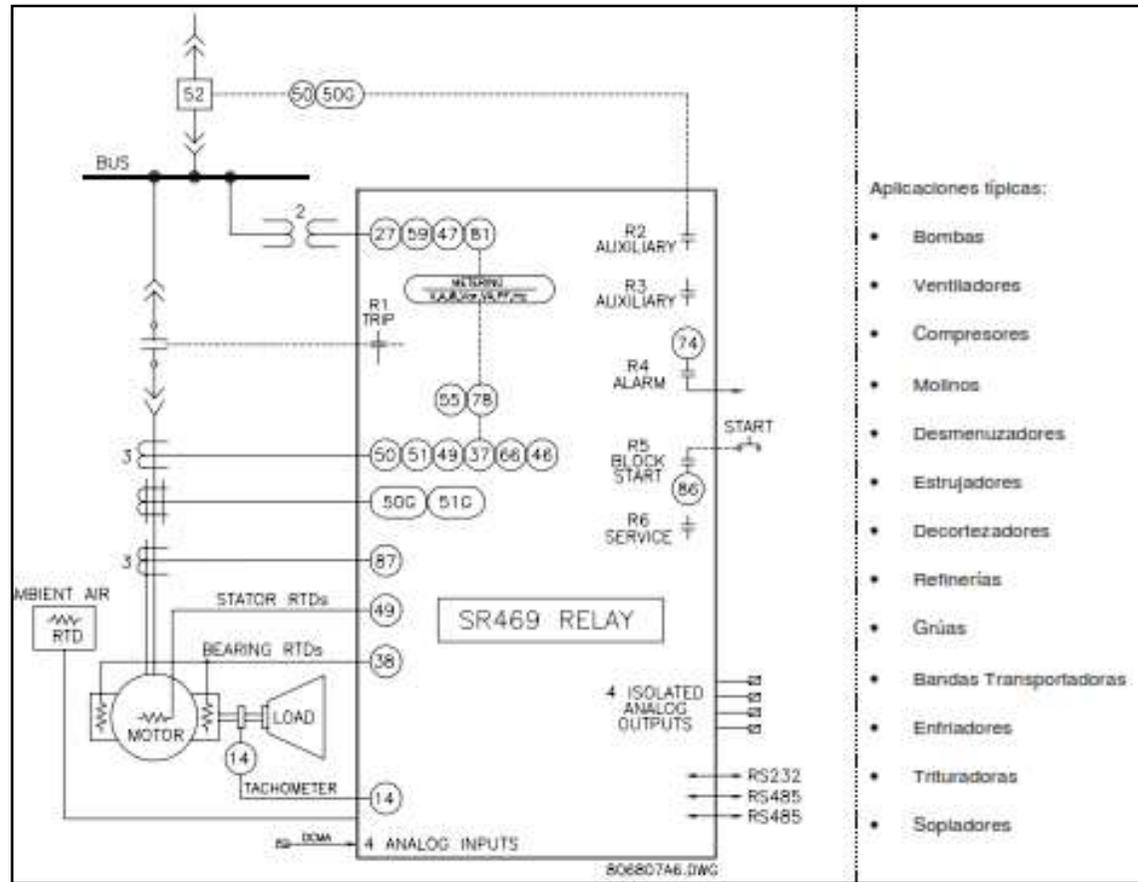


Diagrama unifilar de proteccion del relé SR469.



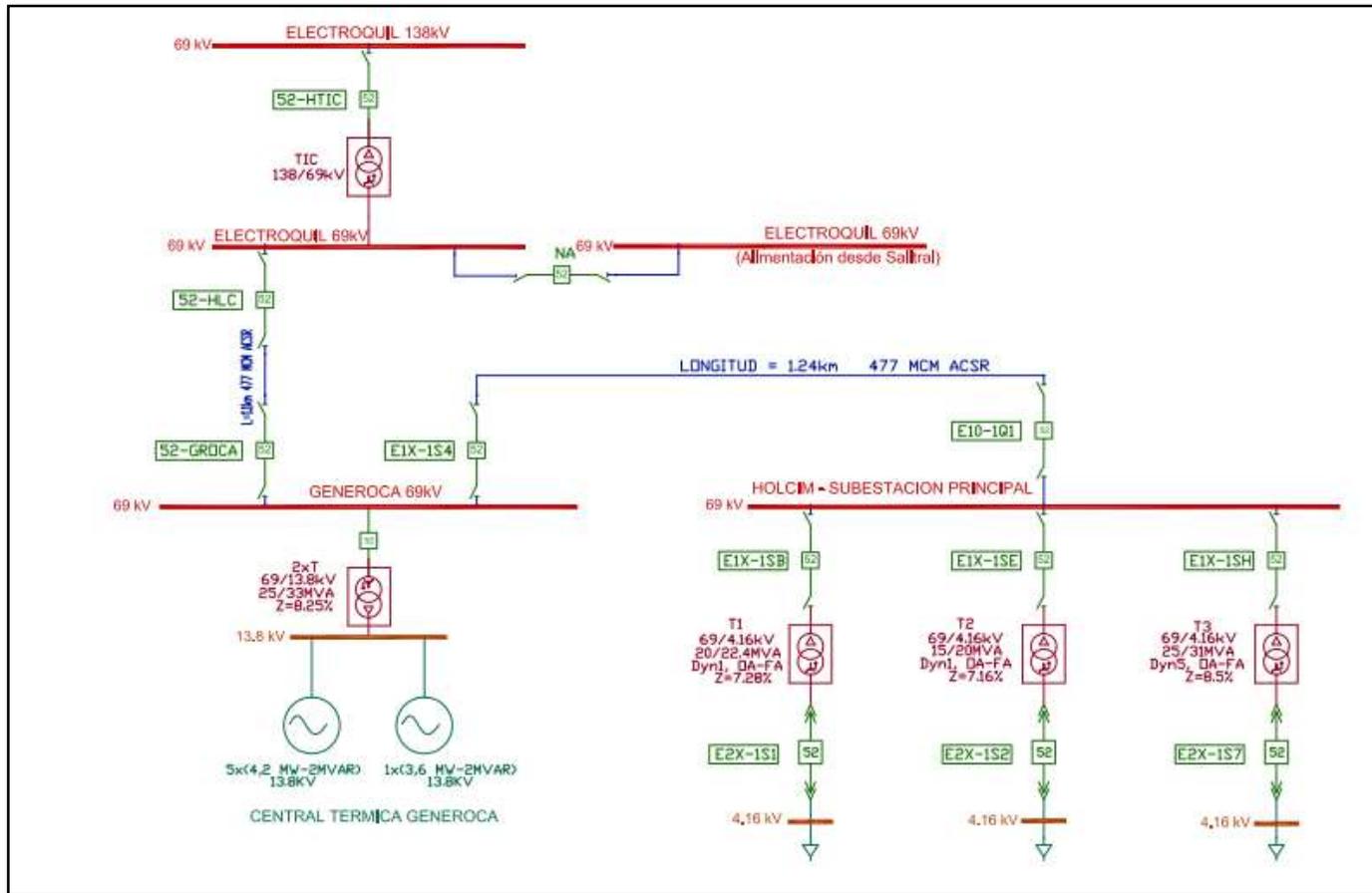
Aplicaciones típicas:

- Bombas
- Ventiladores
- Compresores
- Molinos
- Desmenzadores
- Estrujadores
- Decortezadores
- Refinerías
- Grúas
- Bandas Transportadoras
- Enfriadores
- Trituradoras
- Sopladores

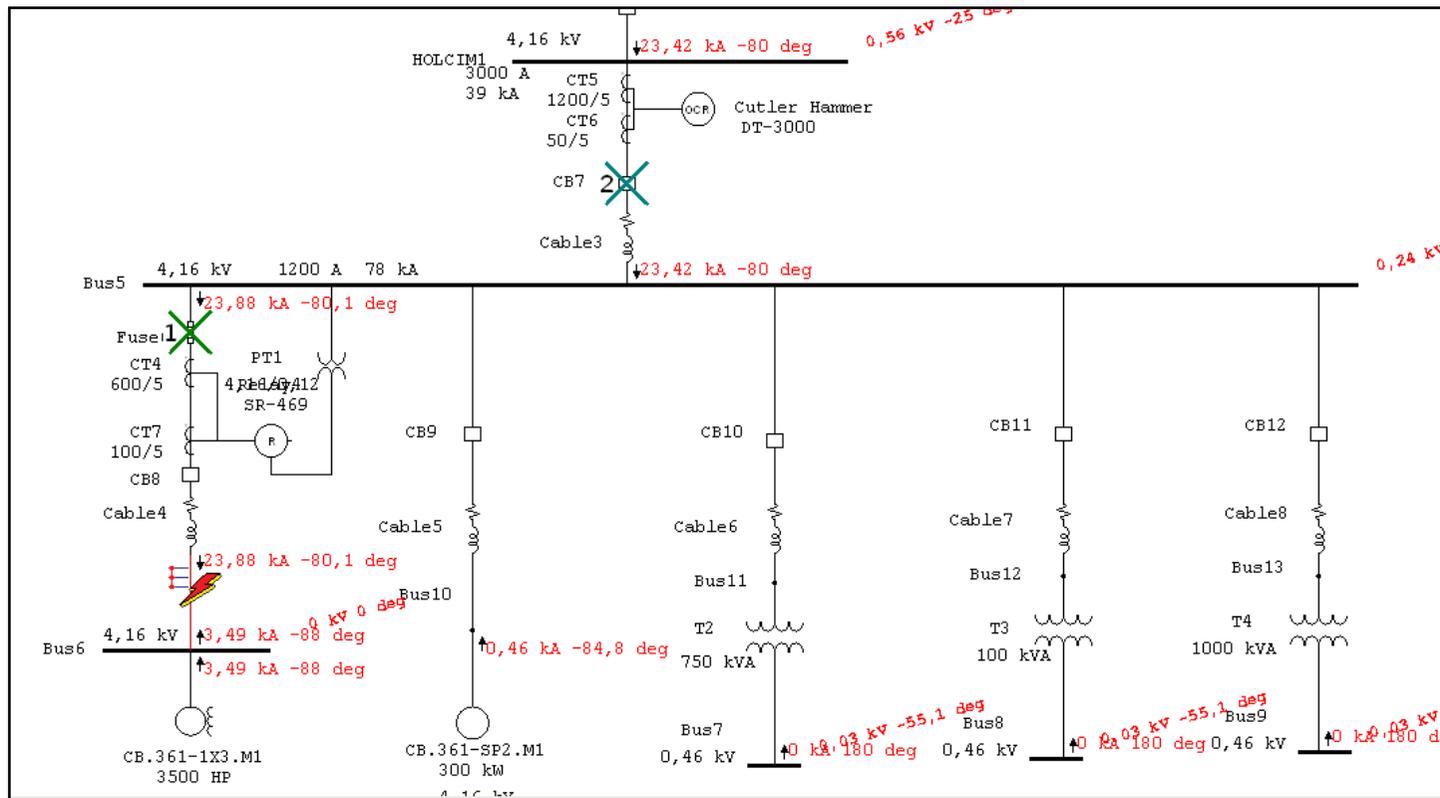
Funciones de protección del relé SR469

ANSI		Trip	Alarm	Block Start	Control
51	Overload	●	●	●	●
86	Overload Lockout			●	
66	Starts/Hour & Time Between Starts			●	
	Restart Block (Anti-Backspin Timer)			●	
50	Short Circuit & Short Circuit Backup	●		●	
	Mechanical Jam	●		●	●
37	Undercurrent/Underpower	●	●	●	
46	Current Unbalance	●	●	●	
50G/51G	Ground Fault & Ground Fault Backup	●	●	●	
87	Differential	●		●	
	Acceleration	●		●	
49	Stator RTD	●	●	●	
38	Bearing RTD	●	●	●	
	Other RTD & Ambient RTD	●	●	●	
	Open RTD Alarm		●		
	Short/Low RTD		●		
27/59	Undervoltage/Oversvoltage	●	●	●	
47	Phase Reversal	●		●	
81	Frequency	●		●	
	Reactive Power	●	●	●	●
55/78	Power Factor	●	●	●	●
	Analog Input	●	●	●	
	Demand Alarm: A kW kvar kVA		●		●
	SR469 Self-Test, Service		●		
	Trip Coil Supervision		●		
	Welded Contactor		●		
	Breaker Failure		●		
	Remote Switch	●	●	●	
14	Speed Switch & Tachometer Trip	●	●	●	
	Load Shed Switch	●		●	
	Pressure Switch	●	●	●	
	Vibration Switch	●	●	●	
19	Reduced Voltage Start				●
48	Incomplete Sequence	●		●	
	Remote Start/Stop				●

Sistema eléctrico unifilar planta Holcim.



Corrientes de cortocircuito y Secuencia de operación de dispositivos del sistema en Etap 7.5



ANEXO B

PLANOS ELECTRICOS

ANEXO C

DATOS DE ANALISIS DE

CORTOCIRCUITO

