



Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ingeniería

**Instrumentación electrónica tolerante a fallas para
Ciclo Binario de Evaporación Instantánea
CBEI-iiDEA®**

Tesis que para obtener el título de

Ingeniero Mecatrónico

Presenta

Miguel Ángel Benítez Torreblanca

Tutor

M.I. Álvaro Núñez Flores

Ciudad Universitaria, Distrito Federal, México, 2015

Jurado asignado

Presidente

Dr. Saúl de la Rosa Nieves

Vocal

M.I. Álvaro Núñez Flores

Secretario

M.I. Héctor Miguel Aviña Jiménez

Primer suplente

Dr. Armando Rojas Morín

Segundo suplente

Dr. Octavio Díaz Hernández

A

Jorge Alberto Téllez Torreblanca

Dime, oh Musa, a cuyos pies mis manos
han dejado
olvidadísimas violetas,
si antes que amanezca
mi voz junto al mar lejano
tendré las nubes necesarias
para ocultarme cuando
mi corazón lo ansíe.

Canto por un recuerdo griego
Carlos Pellicer

Índice general

| | |
|---|----------|
| Índice general | I |
| Resumen | V |
| Agradecimientos | VII |
| Advertencia al lector | IX |
| Índice de figuras | XI |
| Índice de tablas | XIII |
| Lista de acrónimos | XV |
| Nomenclatura | XIX |
| Introducción | 1 |
| Objetivo | 1 |
| Objetivos particulares | 1 |
| Definición del problema | 1 |
| Situación actual | 2 |
| Relevancia y justificación | 3 |
| Alcances y limitaciones | 5 |
| Antecedentes | 5 |
| Método | 7 |
| Resultados esperados | 7 |
| 1. Fundamentos de energía geotérmica | 9 |
| 1.1. Introducción | 9 |
| 1.2. Energías alternas y energías renovables | 10 |
| 1.3. Energía geotérmica | 11 |
| 1.3.1. Estructura interna de la Tierra | 13 |
| 1.3.2. Desarrollo histórico de la geotermia | 14 |
| 1.4. Clasificación de los recursos geotérmicos | 15 |
| 1.4.1. Clasificación por potencial | 15 |
| 1.4.2. Clasificación por tipo de sistema geotérmico | 16 |
| 1.4.3. Clasificación por gradiente térmico | 17 |

| | |
|--|-----------|
| 1.4.4. Clasificación por temperatura | 18 |
| 1.5. Potencial y desarrollo geotérmico en México | 19 |
| 1.6. Relevancia económica de la explotación geotérmica | 22 |
| 1.7. Impacto ambiental | 23 |
| 1.8. Conclusiones | 25 |
| 2. Ciclo Binario de Evaporación Instantánea CBEI-iiDEA® | 27 |
| 2.1. Introducción | 27 |
| 2.2. Generación de potencia eléctrica con energía geotérmica | 28 |
| 2.3. Centrales geotermoeléctricas convencionales | 29 |
| 2.3.1. Ciclo a contrapresión | 29 |
| 2.3.2. Ciclo a condensación | 30 |
| 2.3.3. Ciclos binarios | 33 |
| 2.4. Ciclo Binario de Evaporación Instantánea CBEI-iiDEA® | 34 |
| 2.5. Descripción general de los elementos del CBEI-iiDEA® | 35 |
| 2.5.1. Intercambiador de calor | 35 |
| 2.5.2. Placa orificio | 35 |
| 2.5.3. Separador de flujos | 35 |
| 2.5.4. Turbina | 35 |
| 2.6. Estados termodinámicos del CBEI-iiDEA® | 35 |
| 2.7. Sistema de generación de vapor | 37 |
| 2.8. Sistema experimental de generación de vapor | 38 |
| 2.9. Conclusiones | 39 |
| 3. Fundamentos de confiabilidad y tolerancia a fallas | 41 |
| 3.1. Introducción | 41 |
| 3.2. Riesgo y Peligro | 43 |
| 3.2.1. Identificación de riesgo | 44 |
| 3.2.2. Cuantificación de riesgo | 44 |
| 3.3. Atributos de Confiabilidad | 45 |
| 3.3.1. Fiabilidad (<i>Reliability</i>) | 45 |
| 3.3.2. Disponibilidad (<i>Availability</i>) | 47 |
| 3.3.3. Sostenibilidad (<i>Maintainability</i>) | 48 |
| 3.3.4. Seguridad (<i>Security</i>) | 48 |
| 3.4. Amenazas a la Confiabilidad | 49 |
| 3.4.1. Falla | 49 |
| 3.4.2. Error | 50 |
| 3.4.3. Daño | 51 |
| 3.5. Medios de Confiabilidad | 52 |
| 3.5.1. Remoción de Fallas | 52 |
| 3.5.2. Predicción de Fallas | 53 |
| 3.5.3. Prevención de Fallas | 54 |
| 3.5.4. Tolerancia a Fallas | 54 |
| 3.6. Evaluación de Fiabilidad | 55 |
| 3.6.1. Sistemas reparables y no reparables | 57 |
| 3.6.2. Tasa de averías (λ) | 57 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 3.6.3. | Tasa de restauración (μ) | 59 |
| 3.6.4. | Fallas en el Tiempo [<i>Failure in Time (FIT)</i>] | 60 |
| 3.6.5. | Tiempo Medio Hasta la Falla [<i>Mean Time To Failure (MTTF)</i>] | 60 |
| 3.6.6. | Tiempo Medio Entre Fallas [<i>Mean Time Between Failures (MTBF)</i>] | 61 |
| 3.6.7. | Fiabilidad | 63 |
| 3.6.8. | Consideraciones adicionales | 64 |
| 3.7. | Redundancia | 65 |
| 3.7.1. | Redundancia en Software | 66 |
| 3.7.2. | Redundancia en Información | 66 |
| 3.7.3. | Redundancia en Tiempo | 66 |
| 3.8. | Redundancia en Hardware | 67 |
| 3.8.1. | Evaluación de fiabilidad en sistemas redundantes | 67 |
| 3.8.2. | Redundancia pasiva | 70 |
| 3.8.3. | Redundancia activa | 71 |
| 3.8.4. | Redundancia híbrida | 73 |
| 3.9. | Conclusiones | 73 |
| 4. | Instrumentación electrónica tolerante a fallas para Ciclo Binario de Evaporación Instantánea CBEI-iiDEA® | 75 |
| 4.1. | Introducción | 75 |
| 4.1.1. | Sistema integral de Instrumentación, Control Remoto y Telemetría | 77 |
| 4.2. | Análisis de Modo y Efecto de Falla [<i>Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)</i>] | 78 |
| 4.2.1. | Clasificación | 78 |
| 4.2.2. | Metodología | 79 |
| 4.2.3. | Información contenida | 80 |
| 4.3. | Función requerida | 81 |
| 4.3.1. | Definición | 81 |
| 4.4. | Fundamentos de Instrumentación | 83 |
| 4.4.1. | Sensor | 84 |
| 4.4.2. | Procesamiento | 84 |
| 4.4.3. | Visualización/Registro | 85 |
| 4.5. | Evaluación de sensores | 86 |
| 4.5.1. | Sensores de presión | 86 |
| 4.5.2. | Sensores de temperatura | 87 |
| 4.6. | Localización de sensores | 88 |
| 4.7. | Selección final de sensores | 89 |
| 4.8. | Selección de componentes electrónicos | 90 |
| 4.8.1. | Criterios de selección para componentes electrónicos | 90 |
| 4.8.2. | Tipos de encapsulado | 91 |
| 4.9. | Fuentes de alimentación | 91 |
| 4.9.1. | Definición de Configuración de Entrada | 91 |
| 4.9.2. | Fuentes de tensión | 92 |
| 4.9.3. | Fuentes de corriente | 93 |
| 4.10. | Sistema de Adquisición de Datos (DAQ) | 96 |
| 4.11. | Tarjeta de desarrollo | 98 |
| 4.12. | Límites y restricciones | 98 |

| | |
|---|------------|
| 4.13. Fallas en componentes eléctricos y electrónicos | 99 |
| 4.14. Consideraciones para análisis de fiabilidad | 99 |
| 4.15. Diseño de sistema de Instrumentación | 100 |
| 4.16. Diagrama de Bloques de Fiabilidad [Reliability Block Diagram (RBD)] | 100 |
| 4.17. Tasa de averías de componentes | 102 |
| 4.17.1. Fiabilidad de componentes pasivos | 102 |
| 4.17.2. Fiabilidad de componentes semiconductores | 103 |
| 4.17.3. Fiabilidad de sensores Honeywell PX2EN1XX100PAAAX y USW3577 | 104 |
| 4.18. Cálculo de fiabilidad del sistema | 105 |
| 4.18.1. Fiabilidad de rama 1 y 2, independientes | 105 |
| 4.18.2. Fiabilidad de ramas 1 y 2, en paralelo | 105 |
| 4.18.3. Integración final | 105 |
| 4.19. Propuesta de sistema redundante | 106 |
| 4.19.1. Redundancia en espera (<i>standby</i>) | 106 |
| 4.20. Fiabilidad de sistema redundante | 112 |
| 4.20.1. Fiabilidad de módulos en estados de Markov 1, 2 y 3, independientes | 112 |
| 4.20.2. Fiabilidad de cadena de Markov | 112 |
| 4.20.3. Integración parcial | 112 |
| 4.20.4. Integración final | 112 |
| Análisis de resultados | 113 |
| Conclusiones | 115 |
| Trabajo futuro | 117 |
| Apéndice A. Datos de fiabilidad | 119 |
| Apéndice B. Tablas adicionales | 126 |
| Apéndice C. Notas finales | 129 |
| Bibliografía | 130 |

Resumen

En esta disertación se aborda el diseño teórico de un sistema de instrumentación electrónica tolerante a fallas, mediante la aplicación de redundancia en espera, (*standby*) para supervisión y registro de presión y temperatura de un ciclo de generación geotermoeléctrica.

Se detallan los aspectos fundamentales de la energía geotérmica así como el potencial y desarrollo geotérmico en México como antecedente a la discusión general sobre el Ciclo Binario de Evaporación Instantánea CBEI-iiDEA[®], ciclo desarrollado por el Grupo iiDEA[®] del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, cuyo objetivo es el aprovechamiento de la energía geotérmica de media y baja entalpía con fines de generación de potencia eléctrica.

Finalmente, se introduce la teoría fundamental de la Ingeniería de Confiabilidad y los sistemas tolerantes a fallas como antecedente al diseño del sistema final propuesto.

Página intencionalmente en blanco

Agradecimientos

Al Universo.

A mis padres, Maria Bárbara Torreblanca Mendoza y José Fernando Benítez Aguirre.

A mi familia.

A la Universidad Nacional Autónoma de México.

A la Facultad de Ingeniería.

Al Instituto de Ingeniería.

Al Grupo iiDEA®.

A los siguientes profesores de la Facultad de Ingeniería:

Ing. Jaime Aguilar Reyes, M.I. Emiliano Anguiano Rojas, M.I. Livier Báez Rivas, M.B.A. José Manuel Bahamonde Peláez, Ing. Érik Castañeda de Isla Puga, Dr. Francisco Cuenca Jiménez, Lic. María de Guadalupe Flor Díaz de León Fernández de Castro, Dr. Adrian Espinosa Bautista, M.I. Rigel Gámez Leal, Ing. Héctor Gerardo González Reza, Ing. Javier Gutiérrez Soria, Ing. Gabriel Alejandro Jaramillo Morales, Ing. Alberto Fernando Liebig Frausto, M.I. Eduardo Medina Hernández, Dr. Federico Méndez Lavielle, Ing. Rolando Peralta Pérez, Ing. Victor Hugo Piña Ramírez, Mtra. Margarita Puebla Cadena, Dr. Edmundo Rocha Cózatl, Ing. Moisés Eugenio Rueda Gutiérrez, M.C. Edgar Salazar Salazar, Ing. Carlos Sánchez Mejía Valenzuela, Ing. Francisco Sánchez Pérez, M.I. Hugo Germán Serrano Miranda, Ing. Luis Humberto Soriano Sánchez, Ing. Ricardo Vidal Valles, M.I. Antonio Zepeda Sánchez.

A mis amigos,
Gustavo Basurto Quelite, Frank Bautista Lozano, Mayra Cano Medrano, Gerardo Carranza, Mitzi Carrillo León, Mario Cornejo, César Cortés Rivas, Francisco Esquivel Vargas, Marcos Flores Guerrero, Luis Fourzan Rodríguez, Marco Tonatiuh García García, Laura Hernández, Joselin Jacobo, Alberto Lazcano, David Licea, Alejandro Martínez, Samuel Meléndez Ochoa, Paulina Munguía Landa, Estela Olivares, Jorge Ortega Nieves, Patricia Evy Vasny Palma Maltos, Alejandro Pérez-Sandi Tecuanhuehue, Adán Puente Alonso, Ricardo Sánchez, Karem Valdespino, Marcela Valtierra.

A quienes participaron en el proceso de instrumentación del CBEI-iiDEA[®] en su primera versión funcional y mantuvieron su apoyo durante el desarrollo de este trabajo:
Rodrigo Armenta Santiago, Gerardo Gálvez Muñoz, Pablo García Cerón, Ing. Víctor Garza García, Ing. Luis Herrera Bonilla, Misael Mendoza Ramírez, Abner Nájera Sánchez, Ing. Karina Sierra Doroteo, Ing. Víctor Zenón Arroyo.

A mis maestros de la vida, que han sido muchos, especialmente a Cassandra Caballero Corte, Jorge Chac Gómez, Raúl Renán González y Jorge Zúñiga Olmos.

Al Dr. Octavio Díaz Hernández, Dr. Armando Rojas Morín y al Dr. Saúl de la Rosa Nieves, de quienes tuve la enorme fortuna de aprender y que como jurado de mi examen profesional, amablemente dedicaron tiempo en revisar mi tesis y hacer valiosas correcciones.

Al M.I. Héctor Miguel Aviña Jiménez, por confiar en mí, ayudarme y darme guía.

A mi Tutor, el M.I. Álvaro Núñez Flores, por su paciencia, observaciones y apoyo durante la realización de esta tesis y el proceso de ingreso al programa de posgrado.

Álvaro, Héctor, gracias por todo.

Miguel Ángel Benítez Torreblanca

Advertencia al lector

En esta tesis se abordan algunos términos empleados con regularidad en el área de los sistemas embebidos y electrónica. El autor considera que el lector afín al área preferirá los términos en su idioma original por ser más prácticos y comunes que su equivalente en español, sin embargo, con el espíritu de no crear un texto bilingüe, este trabajo presenta, cuando es posible, una traducción a ciertos conceptos o términos que dentro del mismo criterio pueden ser entendidos y percibidos de forma natural, sin que se tenga la sensación de una traducción literal forzada.

Se tomaron medidas para que el número de palabras y conceptos que aparecieran *de forma exclusiva* en inglés fuera mínimo, y en algunos casos, una traducción equivalente es acompañada del concepto original. De manera excepcional, debido a la falta de una palabra en español que contenga todo el sentido del término original, se mantiene la expresión en inglés.

Página intencionalmente en blanco

Índice de figuras

| | | |
|-------|--|----|
| 1. | Diagrama de bloques de sistema de instrumentación para CBEI-iiDEA [®] , febrero 2015 | 5 |
| 2. | Primera versión del sistema de instrumentación para CBEI-iiDEA [®] , febrero 2015 | 6 |
| 1.1. | Estimación de aporte en consumo global de energía, 2012 | 11 |
| 1.2. | Aplicaciones y usos de la energía geotérmica | 12 |
| 1.3. | Estructura interna de la Tierra | 13 |
| 1.4. | Aspectos de un <i>recurso geotérmico potencial</i> | 15 |
| 1.5. | Mapa geotérmico de Norteamérica | 20 |
| 1.6. | Capacidad geotermoeléctrica mundial instalada, 2014 | 21 |
| 1.7. | Geografía potencial de desarrollos geotérmicos en México | 21 |
| 1.8. | Consumo energético total e Índice de Desarrollo Humano (IDH), 2013 | 23 |
| 2.1. | Eficiencia térmica de plantas de generación de potencia | 28 |
| 2.2. | Ciclo a contrapresión o de vapor seco | 30 |
| 2.3. | Ciclo a condensación con un <i>flash</i> | 32 |
| 2.4. | Ciclo a condensación con dos <i>flash</i> | 32 |
| 2.5. | Ciclo Binario Convencional (CBC) | 33 |
| 2.6. | Ciclo Binario de Evaporación Instantánea iiDEA [®] | 34 |
| 2.7. | Diagrama T-S de CBEI-iiDEA [®] | 36 |
| 2.8. | Estados termodinámicos de Ciclo Binario de Evaporación Instantánea CBEI-iiDEA [®] | 36 |
| 2.9. | Sistema de generación de vapor de Ciclo Binario de Evaporación Instantánea iiDEA [®] (CBEI-iiDEA [®]) | 37 |
| 2.10. | Sistema experimental de generación de vapor | 39 |
| 3.1. | Árbol de confiabilidad | 46 |
| 3.2. | Cadena Falla → Error → Daño | 51 |
| 3.3. | Estado general de un sistema reparable | 52 |
| 3.4. | Técnicas de Tolerancia a Fallas | 56 |
| 3.5. | Evolución típica de la Tasa de Averías en <i>hardware</i> | 59 |
| 3.6. | Diagrama de operación de elemento reparable | 61 |
| 3.7. | Fiabilidad $R(t)$ como función de la Tasa de Averías λ | 64 |
| 3.8. | Elementos en serie | 68 |
| 3.9. | Elementos en paralelo | 69 |
| 3.10. | Configuración de elementos combinados | 70 |
| 3.11. | Redundancia modular n | 71 |
| 3.12. | Redundancia en espera (<i>standby</i>) | 73 |

| | |
|---|-----|
| 4.1. Sistema integral de Instrumentación, Control Remoto y Telemetría del CBEI-iiDEA® | 76 |
| 4.2. Diagrama simplificado de metodología de diseño | 80 |
| 4.3. Sistema de Instrumentación de CBEI-iiDEA® | 82 |
| 4.4. Diagrama general de sistema de instrumentación | 83 |
| 4.5. Taxonomía de sensores físicos | 85 |
| 4.6. Sistema experimental de generación de vapor (repetida) | 88 |
| 4.7. Principio de operación de RTD de 4 hilos | 94 |
| 4.8. $T = f(R, I)$ en RTD | 95 |
| 4.9. Adquisición de datos CBEI-iiDEA® | 97 |
| 4.10. Detalle de interfaz | 97 |
| 4.11. Diagrama de Bloques de Fiabilidad | 100 |
| 4.12. Diagrama esquemático simplificado de sistema de instrumentación | 101 |
| 4.13. Redundancia en espera (repetida) | 107 |
| 4.14. Diseño equivalente de redundancia en espera (<i>standby</i>) | 107 |
| 4.15. Diagrama de flujo de algoritmo de supervisión y selección | 108 |
| 4.16. Diagrama de flujo de algoritmo de supervisión y selección (2) | 108 |
| 4.17. Diagrama esquemático simplificado de sistema redundante en espera | 109 |
| 4.18. Diagrama esquemático de sistema redundante en espera | 110 |
| 4.19. Diagrama de bloques y cadena de Markov de sistema propuesto | 111 |
| | |
| A.1. Cálculo de fiabilidad | 121 |
| A.2. Variación de resistencia nominal de RTD | 121 |
| A.3. Pruebas realizadas a sensores de la serie Honeywell PX2 | 122 |
| 4.4. Datos estadísticos de pruebas de fiabilidad, Central Semiconductors | 123 |
| 4.5. Condiciones de pruebas de fiabilidad, Central Semiconductors | 124 |

Índice de tablas

| | |
|--|-----|
| 1.1. Clasificación de recursos geotérmicos por temperatura | 18 |
| 1.2. Centrales geotermoeléctricas nacionales | 19 |
| 1.3. Probabilidad y severidad de impacto ambiental potencial | 24 |
| 2.1. Condiciones teóricas de sistema de generación de vapor | 38 |
| 2.2. Condiciones máximas de operación | 38 |
| 3.1. Herramientas de identificación de riesgos | 44 |
| 3.2. Unidades de Riesgo (Seguridad y Finanzas) | 45 |
| 3.3. Factores ambientales que influyen la fiabilidad | 47 |
| 3.4. Clases de sistemas de alta disponibilidad [79] | 48 |
| 3.5. Disponibilidad para elementos reparables y no reparables | 62 |
| 4.1. Comparación entre sensores de presión | 86 |
| 4.2. Comparación entre sensores de temperatura | 87 |
| 4.3. Localización de sensores | 88 |
| 4.4. Características generales de sensor de presión Honeywell PX2EN1XX100PAAAX | 89 |
| 4.5. Características generales de sensor de temperatura USW3577 | 90 |
| 4.6. Características de TPS7233 y TPS7250 | 93 |
| 4.7. Características de tarjeta de desarrollo EK-TM4C1294XL | 98 |
| 4.8. Tasa de averías de componentes | 102 |
| 4.9. Fiabilidad de sistema propuesto | 104 |
| 4.10. Estados de diagrama de transición | 111 |
| B.1. Requerimientos energéticos de sensores y tarjeta de desarrollo | 127 |
| B.2. Costo de componentes en configuración sin redundancia | 127 |
| B.3. Costo de componentes con redundancia en frío | 127 |
| B.4. Comparación de costo asociado a sistemas | 128 |
| B.5. Datos de soporte para ELFR, Texas Instruments | 128 |
| B.6. Datos de soporte para MTBF, Texas Instruments | 128 |

Página intencionalmente en blanco

Lista de acrónimos

| | |
|--------------------|--|
| A.D. | Anno Domini |
| a.d.n.e. | Antes de nuestra era |
| ADC | Analog to Digital Converter |
| BP | British Petroleum |
| CBC | Ciclo Binario Convencional |
| CBEI-iiDEA® | Ciclo Binario de Evaporación Instantánea iiDEA® |
| CCD | Constant Current Diode |
| CCF | Common Cause Failure |
| CeMIE | Centros Mexicanos para la Innovación en Energía |
| CeMIE-Geo | Centro Mexicano para la Innovación en Energía Geotérmica |
| CFE | Comisión Federal de Electricidad |
| CIA | Confidentiality, Integrity, and Availability |
| CL | Confidence Level |
| CLD | Current Limiting Diode |
| CMF | Common-Mode Failure |
| CONACYT | Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología |
| CRC | Cyclic Redundancy Check |
| CRD | Current Regulator Diode |

| | |
|---------------|---|
| DAQ | Data Acquisition System |
| DPPM | Defective Parts Per Million |
| EGS | Enhanced Geothermal Systems |
| ELFR | Early Life Failure Rate |
| EMC | Electromagnetic Compatibility |
| EMI | Electromagnetic Interference |
| ESD | Electrostatic Discharge |
| ETA | Event Tree analysis |
| FD | Fault Detection Unit |
| FIT | Failure in Time |
| FMEA | Failure Mode and Effect Analysis |
| FMECA | Failure, Modes, Effects and Criticality Analysis |
| FTA | Fault Tree Analysis |
| GPIO | General Purpose Input Output |
| HDR | Hot Dry Rock |
| HMI | Human-Machine Interface |
| HR | Human Reliability |
| IC | Integrated Circuit |
| IDE | Integrated Development Environment |
| IDH | Índice de Desarrollo Humano |
| IEA | International Energy Agency |
| II | Instituto de Ingeniería |
| iiDEA® | Instituto de Ingeniería, Desalación y Energías Alternas |

| | |
|----------------|---|
| IoT | Internet of Things |
| ISO | International Standards Organization |
| ISP | Internet Service Provider |
| JFET | Junction Gate Field-Effect Transistor |
| LDO | Linear Dropout Regulator |
| MAC | Media Access Control |
| MDT | Mean Down Time |
| MIT | Massachusetts Institute of Technology |
| MTBF | Mean Time Between Failures |
| MTOE | Million of Tonnes of Oil Equivalent |
| MTTF | Mean Time To Failure |
| MTTR | Mean Time To Repair |
| MUT | Mean Up time |
| NASA | National Aeronautics and Space Administration |
| NTC | Negative Temperature Coefficient |
| ONU | Organización de las Naciones Unidas |
| ORC | Organic Rankine Cycle |
| PDIP | Dual In-Line Package |
| PG | Power Good |
| PLX-DAQ | Parallax Data Acquisition Tool |
| PSU | Power Supply Unit |
| PTC | Positive Temperature Coefficient |
| PTP | Precision Time Protocol |

| | |
|----------------|---|
| RAMS | Reliability, Availability, Maintainability and Safety |
| RBD | Reliability Block Diagram |
| REFPROP | Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties Database |
| RTD | Resistive Temperature Detector |
| RTOS | Real-Time Operating System |
| SCR | Silicon-Controlled Rectifier |
| SENER | Secretaría de Energía |
| SIE | Sistema de Información Energética |
| SMU | Southern Methodist University |
| TEB | Total Error Band |
| TI | Texas Instruments |
| TIC | Tecnologías de la Información y la Comunicación |
| UART | Universal Asynchronous Receiver/Transmitter |
| UKAEA | United Kingdom Atomic Energy Authority |
| UNAM | Universidad Nacional Autónoma de México |
| USB | Universal Series Bus |

Nomenclatura

| | |
|--------------|--|
| λ | Tasa de averías |
| μ | Tasa de reparación |
| ∇T | Gradiente térmico |
| $A(t)$ | Disponibilidad |
| I | Intensidad de corriente eléctrica |
| POV | Peak Operating Voltage |
| R | Resistencia eléctrica |
| $R(t)$ | Fiabilidad |
| $R_{std}(t)$ | Fiabilidad del sistema en espera (<i>standby</i>) en el tiempo t |
| T | Temperatura |
| T_{nr} | Tiempo de vida útil (elemento no reparable) |
| T_r | Tiempo de vida útil (elemento reparable) |
| $U(t)$ | Indisponibilidad |
| V | Diferencia de potencial |
| V_L | Maximum Limiting Voltage |
| We | Watts eléctricos |
| Wt | Watts térmicos |
| m | Número total de unidades redundantes |

| | |
|--------|----------------------------|
| n | Número de bits |
| t | Duración de la misión |
| $z(t)$ | Función de tasa de averías |

Introducción

Objetivo

Diseñar un sistema de instrumentación electrónica tolerante a fallas con fines de supervisión y registro de presión y temperatura para un ciclo binario de generación de potencia eléctrica a través de energía geotérmica de baja entalpía, desarrollado por el Grupo iiDEA[®] (Instituto de Ingeniería, Desalación y Energías Alternas) de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Objetivos particulares

- Describir el ciclo termodinámico del CBEI-iiDEA[®]
- Establecer estados y condiciones termodinámicas para selección de sensores
- Aplicar la metodología de Análisis de Modo y Efecto de Falla [*Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)*] para evaluar la fiabilidad del sistema de instrumentación
- Proponer un sistema redundante en espera (*standby*) para fuentes de alimentación

Definición del problema

Los ciclos de potencia convencionales instalados en centrales geotermoeléctricas emplean fluido geotérmico de alta entalpía (generalmente a una temperatura mayor a 200 [°C]) como fluido de trabajo. Uno de los principales inconvenientes de estos ciclos es que el fluido geotérmico, altamente corrosivo, está en contacto permanente con la turbina, intercambiadores de calor y precalentadores. Por lo anterior, el mantenimiento de los ciclos convencionales resulta caro e ineficiente, y como consecuencia, disminuye el factor de planta de la central.

Entre las alternativas de solución a este problema se encuentra la instalación de Ciclos Binarios Convencionales, donde se emplea un fluido orgánico como fluido de trabajo. El principal objetivo de su uso es aprovechar el hecho de que el punto de ebullición de los fluidos orgánicos empleados es menor al punto de ebullición del agua, lo que implica que los requerimientos energéticos del ciclo serán menores.

El Grupo iiDEA[®], parte del Instituto de Ingeniería (II), de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), es un grupo de investigación aplicada basada en el uso y aprovechamiento de la energía geotérmica de media y baja entalpía, concentrándose en tres necesidades fundamentales del ser humano: agua potable a través de la desalación de agua de mar, conservación de alimentos a través del deshidratado y generación de potencia eléctrica.

En esta última áreas, el grupo desarrolló la modificación de un Ciclo Binario Convencional, conocido como Ciclo Binario de Evaporación Instantánea. Este sistema, actualmente en la etapa de *investigación y desarrollo*, tiene un desempeño teórico superior comparado con un Ciclo Binario Convencional bajo ciertas condiciones específicas (recurso geotérmico debajo de 140 [°C] y temperatura ambiente de 25 [°C]).

A partir de su desarrollo surge la necesidad de un sistema de instrumentación de propósito específico (registro y almacenamiento histórico de presión y temperatura); ésto permitirá, además de la validación de datos de diseño, la determinación de condiciones de seguridad y operatividad del sistema, y posteriormente, la aplicación del sistema de instrumentación en un modelo funcional que permitirá, eventualmente, la realización de pruebas una vez instalado en campo.

Situación actual

En el caso global, en el año 2013, de acuerdo con la *Statistical Review of World Energy*, realizada por *British Petroleum (BP)*, el consumo acumulado de aceites, gas natural y carbón, para necesidades primarias, fue de 12,730.4 millones de toneladas equivalentes de petróleo [*Million of Tonnes of Oil Equivalent (MTOE)*], mientras que el consumo obtenido a partir de fuentes nucleares, hidráulicas y renovables, fue de 1,698.3 [MTOE].

Las cifras anteriores representan el 86.65 % y el 13.34 % del consumo mundial de combustibles; dentro de esta última categoría, sólo el 2.19 % fue aportado por fuentes de energía renovables[1].

En México, de acuerdo con datos del Sistema de Información Energética (SIE) de la Secretaría de Energía (SENER), hasta finales del año 2014, se contaba con una capacidad instalada en centrales geotermoeléctricas de 813.4 [MWe] [2]. Dicha capacidad generó 6,000 [GWh], lo que representa el 2.3 % de la generación eléctrica nacional de ese año [3].

Por otro lado, el total mundial de petrolíferos consumidos en 2014 (gas licuado de petróleo, gasolinas y naftas, querosenos, diesel y combustóleos) sumado al consumo de carbón, coque de carbón, coque de petróleo y gas seco, para fines de generación eléctrica, representa un consumo de 40.445 millones de barriles de combustóleo; 2.335 millones de barriles de diesel; 15.529 millones de toneladas de carbón y 447,382 millones de pies cúbicos de gas natural [4]. Como consecuencia, se pone en evidencia el lugar prioritario que aún tiene el uso de los combustibles fósiles en México y el mundo.

Relevancia y justificación

En marzo de 2013 la SENER publicó una iniciativa para el desarrollo de proyectos basados en energía geotérmica. En este documento se hace una revisión histórica acerca de las estimaciones realizadas sobre el potencial geotérmico en México y se concluye que a pesar de que los resultados publicados en dichas estimaciones difieran debido a la región analizada y la metodología empleada, actualmente se tiene un potencial probable de 1,500 [MWt], posible de 6,500 [MWt], y estimado global de 8,000 [MWt].

En la prospectiva mundial, de acuerdo con la *International Energy Agency (IEA)*, se estima que en el año 2035 la demanda de energía proveniente de combustibles fósiles disminuirá del 82 % al 76 %, y que las fuentes de energías renovables y nucleares representarán el 40 % de la demanda primaria de energía [5].

Dentro de las acciones tomadas por México, en 2013 se publican las convocatorias para la constitución de los Centros Mexicanos para la Innovación en Energía (CeMIE), iniciativa de la SENER y el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), con el objetivo fundamental de aprovechar las energías renovables a partir de tres fuentes principales: la energía eólica, geotérmica y solar [6].

En el caso de la energía geotérmica se tiene el Centro Mexicano para la Innovación en Energía Geotérmica (CeMIE-Geo), alianza entre la academia y la industria, que tiene como propósito específico aprovechar, fortalecer y promover la energía geotérmica, así como desarrollar recursos humanos especializados en el área. [7]

Parte de la justificación de la conformación de los CeMIE es la Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética, publicada en 2008 y modificada continuamente hasta el 2013, donde se establece que la SENER tendrá como meta establecer la participación máxima de combustibles fósiles en la generación de energía eléctrica a 65 % en el 2024 y disminuir progresivamente su participación hasta el 60 % en el 2035 y 50 % en el 2050 [8].

Se estima que para el año 2016 se tendrá una generación del 30.3 % en el Sistema Eléctrico a partir de combustibles no fósiles y renovables; de esta participación, se proyecta el 18 % de capacidad hidroeléctrica, 8.2 % eoloeléctrica, 1.7 % nucleoeeléctrica, y 2.4 % a capacidad geotermoeléctrica, solar y biogas.

Iniciando operaciones en el 2014, en el CeMIE-Geo participan 11 instituciones de investigación y/o educación superior, así como 11 empresas mexicanas [9]. Las principales áreas de trabajo del CeMIE-Geo son las siguientes [10]:

- Caracterización geográfica de recursos geotérmicos
- Desarrollo de nuevas técnicas de supervisión
- Generación de potencia eléctrica con baja, media y alta entalpía
- Investigación y desarrollo de materiales
- Usos directos de la energía geotérmica

Otra de las propuestas del CeMIE-Geo es la creación de siete laboratorios especializados en análisis de diferentes aspectos relacionados con la explotación de la energía geotérmica; éstos abordan el análisis de rocas, yacimientos y fluidos geotérmicos, vulcanología y granulometría, modelado y simulación numérica, y análisis isotópico [11].

Como consecuencia de lo abordado en esta sección resulta imperante, necesario y sobretodo útil, el desarrollo geotérmico en México, el único país en Latinoamérica que posee el conocimiento de la geotermia, desde la exploración, hasta la producción, además de ser el cuarto país en el mundo con la mayor capacidad instalada en centrales geotermoeléctricas [12].

El II, a través del grupo multidisciplinario iiDEA[®], participa en el CeMIE-Geo con el proyecto “Desarrollo tecnológico para el aprovechamiento de la geotermia de baja entalpía”; en el caso específico del CBEI-iiDEA[®] se aborda el aprovechamiento de energía geotérmica de baja entalpía con fines de generación eléctrica.

Alcances y limitaciones

La aplicación de las técnicas de tolerancia a fallas pretende proporcionar al sistema de instrumentación una mayor fiabilidad en las operaciones de supervisión y adquisición de datos, sin embargo el estudio se restringe al nuevo diseño teórico y la integración de redundancia en espera para fuentes de alimentación de sensores (presión y temperatura) y tarjeta de desarrollo, con la limitación de que no se documenta la puesta en marcha y la eventual integración con las áreas de Telemetría y Control Remoto.

Antecedentes

Durante la primera etapa de instrumentación del CBEI-iiDEA[®], se realizó el análisis y selección de sensores de presión y temperatura a partir de las necesidades del ciclo (éste proceso se documenta en la sección 4.5); de manera complementaria se abordó el problema de la alimentación de dichos sensores a partir de elementos prácticos, económicos y con disponibilidad inmediata. Como consecuencia de lo anterior, se hizo uso de la tarjeta de desarrollo Arduino MEGA como Sistema de Adquisición de Datos [*Data Acquisition System (DAQ)*]; en el caso de las fuentes de alimentación se emplearon los siguientes Circuitos Integrados [*Integrated Circuit (IC)*]:

- LM2575 como fuente de alimentación de 5[V]
- LM334Z como fuente de corriente (0.7[mA])

La Figura 1 muestra el diagrama de bloques simplificado de la primera versión de la instrumentación del CBEI-iiDEA[®], donde se observan los *buses* de alimentación para los sensores de presión y temperatura.

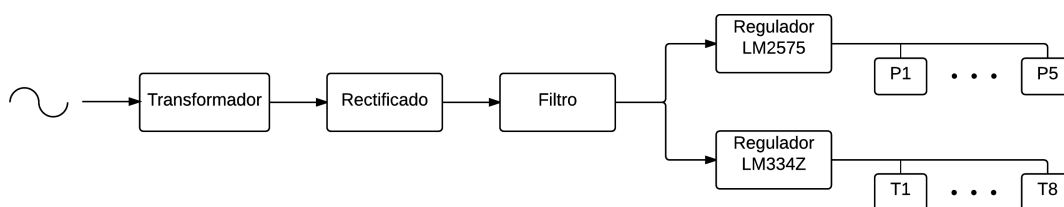


Figura 1: Diagrama de bloques de sistema de instrumentación para CBEI-iiDEA[®], febrero 2015

A pesar de que este sistema temporal fue empleado durante etapas experimentales preliminares y fue herramienta para la generación de tesis de miembros del Grupo iiDEA[®], se observó que las fuentes de alimentación eran inestables y susceptibles a variaciones de temperatura; por otra parte, se identificó que la tarjeta de desarrollo empleada no satisfaría los requerimientos de comunicación y expansión de etapas futuras ya que dentro de los objetivos actuales del CBEI-iiDEA[®] no sólo se pretende realizar pruebas experimentales en laboratorio sino que, eventualmente, se realicen *in situ*.

Como consecuencia de la necesidad de contar con un sistema de instrumentación de alta precisión, y atendiendo a las condiciones agresivas de la operación en campo, se puso en evidencia la urgencia de técnicas que ofrecieran una solución de funcionamiento continuo, como la tolerancia a fallas.

Este nuevo diseño, de arquitectura modular, permite que las eventuales mejoras en *hardware* sean posibles y que el mantenimiento en *software* sea no sólo una característica potencial, sino complementada con áreas de Telemetría y Control Remoto.

En conclusión, este trabajo tiene como antecedente un sistema de instrumentación funcional y operacional (mostrado en la Figura 2), que tomado como base, se lleva a un nivel de alta fiabilidad mediante la aplicación de redundancia en espera para fuentes de alimentación.



Figura 2: Primera versión del sistema de instrumentación para CBEI-iiDEA[®], febrero 2015

Método

En el presente trabajo se introduce a lector en las bases fundamentales de la energía geotérmica con el fin de establecer un contexto sobre la relevancia del desarrollo tecnológico para el aprovechamiento de la energía geotérmica de baja entalpía. Posteriormente, se analiza el CBEI-iiDEA[®] a partir de su principio general de operación, así como los elementos a considerar en el registro de variables físicas.

Una vez formalizado el entorno general antecedente a este trabajo, se presentan las bases teóricas de la Ingeniería de Fiabilidad, con el objetivo de emplear estas técnicas en el desarrollo de un sistema de Instrumentación tolerante a fallas.

Con el contexto del proyecto y las bases teóricas suficientes, se analiza y justifica la localización física de sensores de presión y temperatura en el CBEI-iiDEA[®], además de desarrollar una disección sobre los sensores a emplear; de forma complementaria, se realiza una selección de fuentes de alimentación y una disertación sobre la tarjeta de desarrollo a usar. Con este conjunto preliminar, se analiza el sistema y sus elementos, obteniendo una fiabilidad inicial.

De forma adicional, se propone una Interfaz Humano-Máquina [*Human-Machine Interface (HMI)*] para el registro y almacenamiento de datos experimentales.

Finalmente, se desarrolla un sistema de Instrumentación tolerante a fallas, redundante en *hardware* (redundancia en espera), con el propósito de generar un sistema con mayor fiabilidad para las operaciones del CBEI-iiDEA[®] en laboratorio y eventualmente, en campo.

Resultados esperados

Se espera que el CBEI-iiDEA[®] cuente con el diseño integral teórico de un nuevo sistema de instrumentación, robusto y confiable, tolerante a fallas, con fines de supervisión y registro de presión y temperatura, capaz de operar bajo las condiciones de laboratorio actuales y soportar las eventuales condiciones de operación de campo, con el fin de validar el diseño realizado por el Grupo iiDEA[®] y establecer las bases de los próximos sistemas de instrumentación a gestar.

Página intencionalmente en blanco

Capítulo 1

Fundamentos de energía geotérmica

1.1. Introducción

A pesar de ser un término empleado con frecuencia dentro de la ingeniería, existe cierta limitación en el conocimiento de la energía. La necesidad de definir un concepto tan abstracto ha, incluso, tenido consecuencias en áreas como la filosofía. De acuerdo con McGinn, el hecho de conocerla a partir de su definición clásica, no es determinante. En el individuo permanece cierta sensación de desconcierto, incluso angustia, por la condición de que a pesar de entender a la energía en términos cuantitativos, no se tiene la total certeza de *comprender* la esencia de su significado y las implicaciones que tiene como elemento motriz y generador. Como consecuencia de lo anterior, afirma lo siguiente:

“(...)la energía es un elemento único y homogéneo, con múltiples formas materiales. Es un atributo o estado real que puede ser compartido por distintos sistemas físicos. La Ley de la Conservación de la Energía, entonces, manifiesta la existencia persistente de esta entidad y su transferencia espacial de un sistema a otro. Es capaz de transformaciones dramáticas, presentándose en un sistema, luego en otro, a través de diferentes fenómenos, siempre uniforme (...). La energía es una realidad física imperecedera que viaja entre objetos y sistemas, sin ganar ni perder intensidad.”[13]

En conclusión, se *conoce* a la energía a partir de sus manifestaciones y transformaciones que experimenta. Lo anterior tiene especial relevancia cuando es aprovechada dentro del desarrollo humano, con el fin de contribuir a su bienestar.

En este capítulo se detallan los elementos conceptuales más importantes sobre la energía geotérmica, así como aspectos generales de su uso, relevancia y explotación en México y el mundo.

1.2. Energías alternas y energías renovables

En un sentido general, la *energía renovable* es una fuente de energía que es restaurada por procesos naturales. Esto es, energía contenida en un reservorio natural, restaurada en una escala de tiempo abismal en comparación con el tiempo histórico de la especie humana. La virtud de este tipo de energía es que si se explota de forma adecuada es prácticamente ilimitada para el periodo de vida de generaciones [14]. Por otro lado, el término *energía alterna* es comúnmente asociado a la energía que no es obtenida a partir de combustibles fósiles y medios convencionales.

La energía renovable incluye, además de la energía geotérmica, la hidráulica, eólica, solar fotovoltaica, solar térmica y la biomasa. Estos tipos de energía renovable son empleadas en la generación de energía eléctrica o energía calorífica.

Resulta importante destacar el hecho de que el desarrollo de la economía global no sólo depende del sector energético, sino de otros factores de igual relevancia como el aumento de la población, tendencias económicas generales, cambios estructurales y desarrollo tecnológico. De igual forma, la influencia de parámetros económicos, marcos legales y ambientes políticos dan guía para el uso y consumo general de la energía [15].

Las fuentes de energía renovable son determinantes en la producción de servicios energéticos en una manera sustentable y en particular, mitigando los efectos del cambio climático[16]. En el caso del desarrollo geotérmico mundial, se instalaron cerca de 530 [MWe] en 2013, estableciendo una capacidad instalada global de 12 [GWe][17].

A pesar de lo anterior, los combustibles fósiles continúan manteniendo la proporción mayoritaria en el consumo de combustibles. La Figura 1.1 muestra la proporción del consumo de energía en el año 2012 para estos combustibles, así como las correspondientes a la energía nuclear y energías renovables.

Para contrarrestar esta tendencia del uso masivo de combustibles fósiles, existen propuestas sobre cómo abordar una transición desde la dependencia de estos combustibles hasta el uso extensivo de energías renovables.

Una de ellas, presentada por Eibenschutz[18], considera los siguientes tres escenarios para los siguientes cincuenta años:

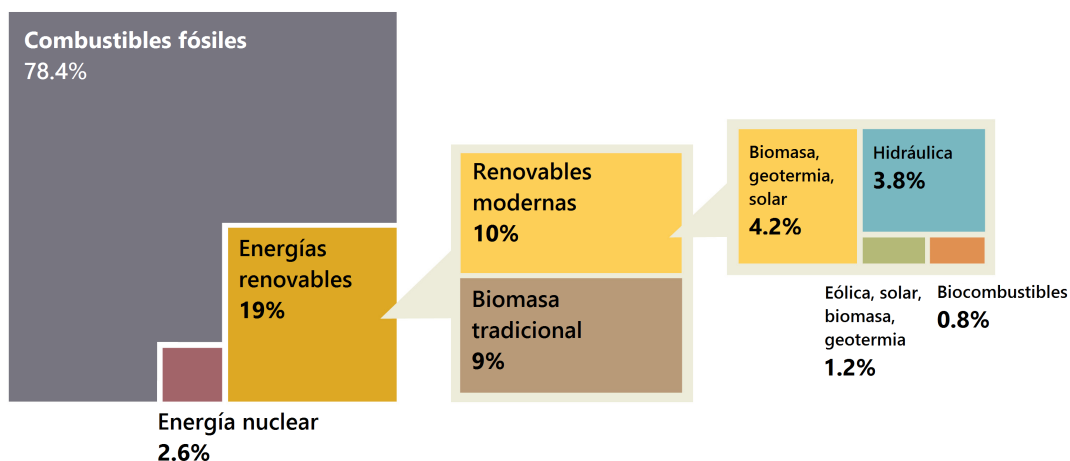


Figura 1.1: Estimación de aporte en consumo global de energía, 2012. Adaptada de [17].

Transición gradual Conservación y eficiencia energética, asociado con una estabilización en la población mundial y un incremento económico general. El uso de energía nuclear y renovable, así como de gas natural, será extensivo.

Reajuste Reacción económica a la generación de subsidios, disminución de reservas energéticas, cambio climático abrupto y restricciones en suministros.

Progreso Fusión energética, conversión directa de energía, cambio de ambiente de destrucción hacia ambiente de bienestar general y reivindicación de valores.

1.3. Energía geotérmica

La palabra *geotermia* proviene de las palabras griegas “*geo*” y “*therme*”, cuyo significado es *Tierra* y *calor* respectivamente. La energía geotérmica es la energía térmica natural existente en el interior de la tierra; esta energía tiene como origen la formación del planeta ($\approx 10\%$) y el decaimiento radioactivo de elementos contenidos debajo de la superficie ($\approx 90\%$) [19].

En la práctica, la *geotermia* se refiere al estudio y utilización de la energía geotérmica. La Figura 1.2 muestra los usos y aplicaciones principales de la energía geotérmica a partir de la temperatura del fluido geotérmico.

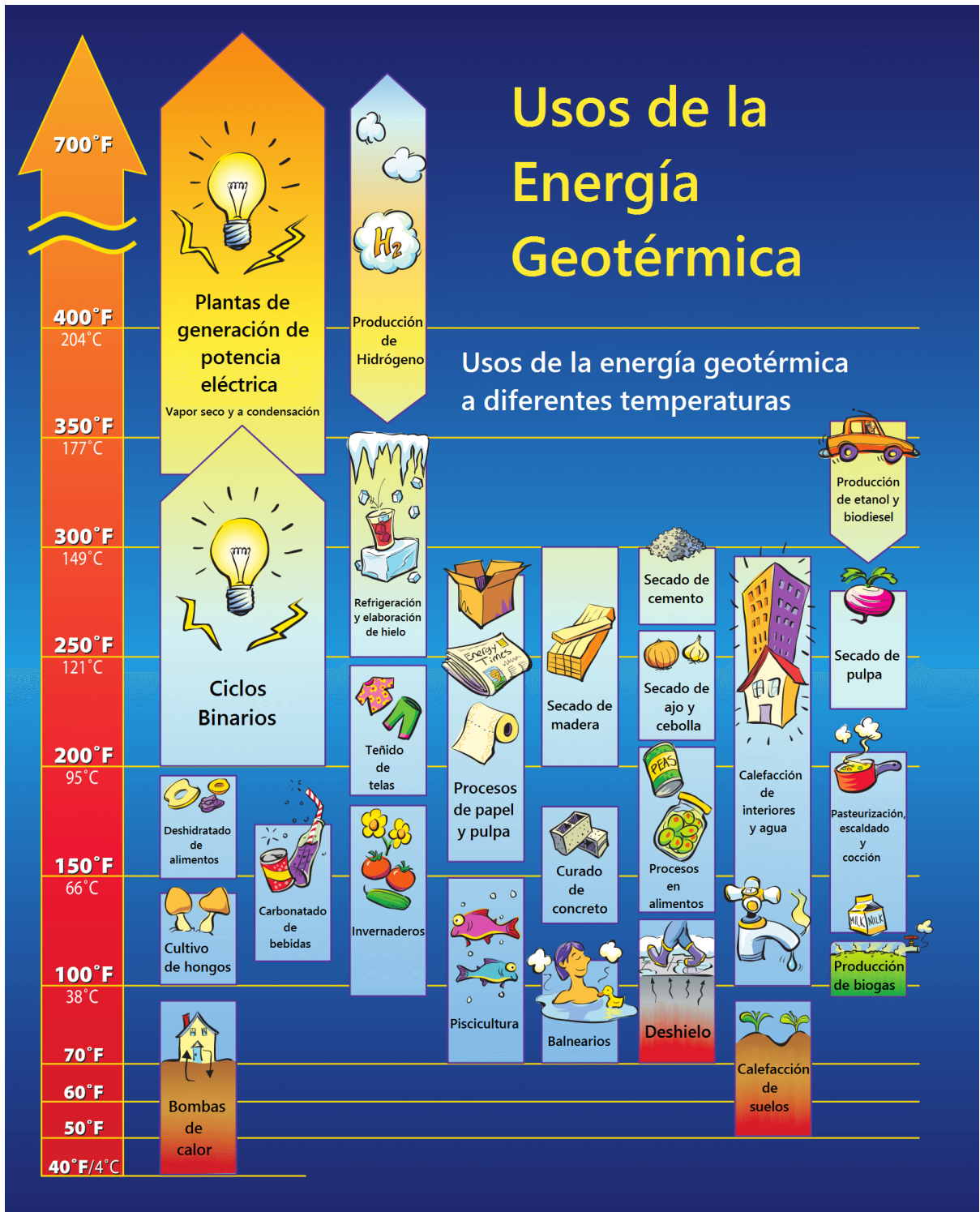


Figura 1.2: Aplicaciones y usos de la energía geotérmica. Adaptada de [20].

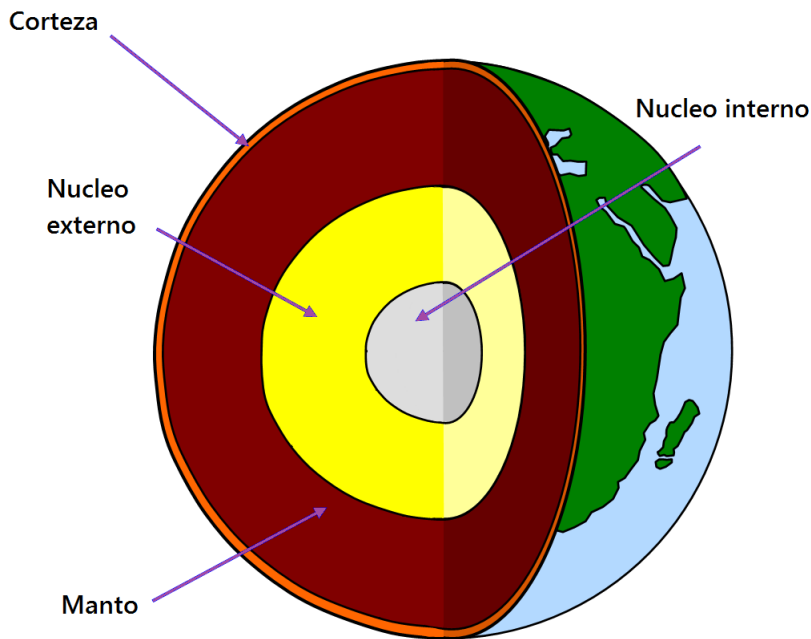


Figura 1.3: Estructura interna de la Tierra. Adaptada de [22].

1.3.1. Estructura interna de la Tierra

De la totalidad de la masa del planeta, el 99% tiene una temperatura superior a los 1,000 [°C] y sólo el 0.1% de ella tiene una temperatura menor a 100 [°C]. Como se muestra en la Figura 1.3, la estructura interna de la Tierra, en su forma más sencilla, tiene tres capas: corteza, manto y núcleo (interno y externo). A continuación se describen algunas de sus características más relevantes [21], [22]:

Corteza Representa cerca del 1% del volumen total de la Tierra y la temperatura promedio en su superficie es de 14 [°C]. En plataformas continentales su espesor promedio es de 35 [km], y en el caso de los océanos, la profundidad promedio es de 5 [km].

Manto Formado de silicato de magnesio, su espesor se estima en 2,900 [km]. Compone cerca del 80% del volumen de la Tierra y el 65% de su masa.

Núcleo Correspondiente al 16% del volumen total de la Tierra, y al 32% de su masa, el núcleo está formado por una aleación de Hierro y Níquel, a más de 5,800 [°C], equivalente a la temperatura en la superficie del Sol. Por otro lado, la presión en el interior es cercana a los 400 [GPa] y su radio se estima en 3,500 [km]. El núcleo interior es sólido, con una densidad promedio de $13,500 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$, mientras que el núcleo exterior, a 2,900 [°C], se encuentra en fase líquida.

1.3.2. Desarrollo histórico de la geotermia

Existen diversos hechos históricos clave en el desarrollo de la geotermia, algunos de los más sobresalientes se describen en la siguiente cronología [19].

10,000 - 2,000 a.d.n.e. En las áreas del Mediterráneo, Mesoamérica y Japon, comienza el uso de aguas termales para baño y cocina, así como para ceremonias religiosas y santuarios.

60 A.D. Los Romanos incorporan baños geotérmicos en Aquae Sulis, comunidad en la provincia de Britannia. Los primeros baños fueron construidos por el Rey Bladud, en el año 836 a.d.n.e.

1300s Se construye el primer sistema de calefacción en Chaudes-Aigues, Francia, empleando agua a 82 [°C]; este sistema aún se encuentra en uso.

1904 Piero Ginori, Conde de Italia, produce electricidad por medio de energía geotérmica en un sistema experimental conocido como *ciclo indirecto*.

1913 Se construye la primera central geotermoeléctrica en el mundo, ubicada en Larderello, Italia.

1948 Carl Nielsen, de la Universidad de Ohio, Estados Unidos, instala la primera bomba de calor geotérmica.

1959 Se construye la primera central geotermoeléctrica en México, ubicada en Pathé, Hidalgo, con una capacidad instalada de 3 [MWe]. Su operación fue de 14 años, con una producción promedio de 500 [kWe]. México fue el tercer país en construir y operar una central geotermoeléctrica, después de Italia y Nueva Zelanda [23], [24].

1960 Se construye la primera central geotermoeléctrica de gran escala en Estados Unidos, en Los Géiser, California. Actualmente es el campo geotérmico más grande del mundo.

1961 Harry Zvi Tabor y Lucien Bronicki demuestran el uso de los Ciclos Rankine Orgánicos [*Organic Rankine Cycle (ORC)*], los cuales emplean un fluido de trabajo orgánico, con un punto de ebullición menor al agua y alta masa molecular.

1981 Ormat, empresa dedicada a la generación de potencia eléctrica mediante energías renovables, demuestra la viabilidad técnica de centrales geotermoeléctricas de ciclo binario a gran escala.

1990s Se desarrolla e inicia operaciones el Ciclo Kalina, ciclo binario que emplea mezclas de amoniaco y agua como fluido de trabajo.

2013 La central geotermoeléctrica de Larderello cumple 100 años en operación.

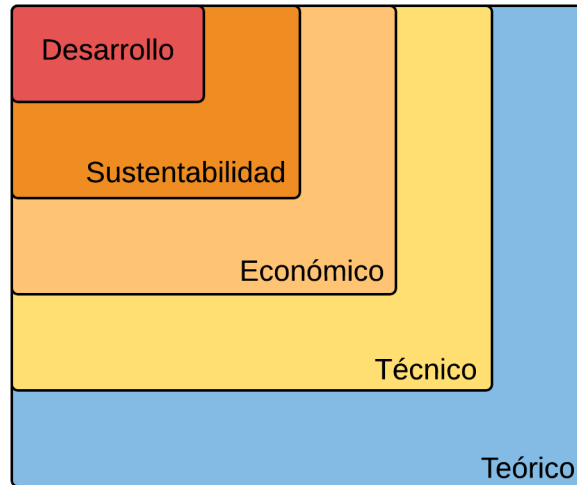


Figura 1.4: Aspectos de un *recurso geotérmico potencial*. Adaptado de [25].

1.4. Clasificación de los recursos geotérmicos

Los requerimientos determinantes e invariables para la existencia de un sistema geotérmico son los siguientes:

- Fuente de calor
- Reservorio que sea capaz de acumular calor
- Capa sello que contenga al calor acumulado

A partir de sus características, los sistemas geotérmicos se pueden clasificar por potencial, tipo de sistema geotérmico, gradiente térmico y temperatura.

1.4.1. Clasificación por potencial

El término *recurso geotérmico potencial* involucra múltiples áreas sobre su viabilidad y factibilidad, elementos que en conjunto permiten la evaluación integral del yacimiento. La clasificación propuesta por Rybach involucra aspectos teóricos, técnicos, económicos, de sustentabilidad y desarrollo [25], los cuales se abordarán brevemente. Por otro lado, la Figura 1.4 ilustra las consideraciones involucradas en la evaluación de un *recurso geotérmico potencial*.

Potencial teórico Estima la energía total contenida existente a lo largo de cierto periodo en una región determinada. Debido a restricciones técnicas, estructurales y administrativas, sólo una fracción del potencial teórico puede ser realmente explotado.

Potencial técnico Describe la fracción del recurso geotérmico que puede ser explotado bajo las limitaciones técnicas y legales actuales.

Potencial económico Aborda la porción del potencial técnico que bajo las condiciones de tiempo y ubicación, puede ser económicamente rentable considerando, entre otros elementos, gastos de inversión, operación y mantenimiento.

Potencial de sustentabilidad Trata la fracción del potencial económico que puede ser aprovechado a partir de niveles de explotación sustentables, es decir, manteniendo tasas bajas de producción y prolongando la vida útil del recurso, con la consideración de un mayor periodo de recuperación de inversión.

Potencial de desarrollo Describe la proporción del potencial económico que puede ser explotado bajo regulaciones ambientales y sociales, así como consideraciones y condiciones reales.

1.4.2. Clasificación por tipo de sistema geotérmico

Vapor dominante La mayoría de los campos geotérmicos de este tipo contienen agua a altas presiones y temperaturas. Cuando el agua alcanza la superficie de la tierra, el cambio súbito de presión ocasiona una evaporación instantánea, generando una mezcla de vapor saturado y agua [26]. Algunas de las centrales geotermoeléctricas más representativas instaladas en este tipo de región son Cerro Prieto (México), Wairakei (Nueva Zelanda), Reykjavik (Islandia), *Salton Sea* (Estados Unidos) y Otake (Japón) .

Otros casos particulares son los de Larderello y Los Géiser, donde se produce vapor sobrecalentado; este tipo de campo es conocido como *Campo de vapor seco*.

Hidrotermal Se diferencian del caso anterior en el hecho de que la fase predominante del fluido geotérmico es líquida; como consecuencia de lo anterior, la transferencia de calor se realiza por convección desde la fuente de calor hasta el reservorio somero [26].

Geopresurizado Estos sistemas se definen como “*un ambiente hidrotermal tal que el agua a alta temperatura está casi completamente aislada de cualquier intercambio con las rocas circundantes*” [27]. Estos reservorios que de manera natural contienen agua a alta temperatura y presión [28] se diferencian de los sistemas hidrotermales al contener tres fuentes de energía: térmica, hidráulica, y gas metano [29].

Roca Seca Caliente [Hot Dry Rock (HDR)] Estudios llevados a cabo sobre yacimientos geotérmicos indican que los recursos de HDR son más abundantes que los recursos hidrotermales [30]. Asimismo, la evaluación del enorme potencial de la explotación de estos recursos mediante la instalación de Sistemas Geotérmicos Mejorados [Enhanced Geothermal Systems (EGS)] no es nueva, y desde hace casi dos décadas se realizó dicha estimación [31].

De forma general, un EGS se define como “el desarrollo de un sistema geotérmico donde la capacidad de flujo natural del sistema no es suficiente para una adecuada generación de potencia, pero la fractura hidráulica del sistema es una medida para el desarrollo comercial del yacimiento” [32].

Magma El magma es roca fundida, la cual mantiene su fluidez hasta que se solidifica a temperaturas entre 600 y 1,400 [°C]. Dentro de la geotermia, el magma es considerado como la fuente determinante en los yacimientos de alta temperatura. Dada la existencia de magma en los reservorios, la perforación resulta complicada y costosa.

1.4.3. Clasificación por gradiente térmico

En el estudio geofísico, uno de los parámetros más importantes es el de *flujo de calor*. Este fenómeno involucra múltiples elementos característicos de la región y del tipo de roca del yacimiento. El calor contenido en la tierra es conducido hacia la superficie a través de las rocas y/o fluido geotérmico. De modo general, la conductividad térmica depende de los tipos de minerales incrustados, la capacidad térmica específica de la roca y el fluido, y la porosidad de la roca [33].

Por otro lado, el gradiente térmico se define de forma elemental como la tasa de variación de la temperatura respecto a cierta distancia y dirección. Asumiendo un gradiente unidireccional, se define matemáticamente como sigue:

$$\nabla T = \frac{\Delta T}{\Delta z} \quad (1.4.3.1)$$

Donde:

$$[\nabla T]_u = \left[\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{km}} \right] \quad (1.4.3.2)$$

Lo anterior es el precedente para definir tres clases de regiones geotérmicas a partir de su gradiente térmico [30]:

1. Hipertermal, $\nabla T \geq \frac{80^\circ C}{km}$
 Estas regiones se encuentran generalmente en la interfaz de placas tectónicas. La central de Larderello, así como la mayoría de las centrales geotermoeléctricas, están localizadas en este tipo de regiones.
2. Semitermal, $\nabla T \sim \frac{(40 - 80)^\circ C}{km}$
 Estas regiones son asociadas a fallas o anomalías en regiones alejadas de las fronteras de las placas tectónicas. El modo de aprovechamiento de estas regiones es a través de la fractura de HDR o la explotación de acuíferos cuando éstos están disponibles.
3. Normal, $\nabla T < \frac{40^\circ C}{km}$
 Estas últimas regiones no son consideradas en la explotación rentable de proyectos geotérmicos dado su flujo de calor conductivo bajo $\left(\sim \frac{0.06W}{m^2} \right)$. Estas regiones se muestran en color amarillo en la Figura 1.5, comentada en la sección 1.5.

1.4.4. Clasificación por temperatura

Existen numerosos criterios para la clasificación de los recursos geotérmicos en base a la temperatura del fluido geotérmico; de modo general, los más sobresalientes son los presentados en la Tabla 1.1.

Para fines de generación de potencia eléctrica, el recurso más usado es el de alta entalpía. Por otro lado, los recursos de media y baja entalpía son empleados generalmente para usos directos, es decir, aquellas aplicaciones mostradas en la Figura 1.2 que no incluyen la generación.

Tabla 1.1: Clasificación de recursos geotérmicos por temperatura. Adaptada de [19]

| Categoría | Muffler [34] | Hochstein [35] | Benderitter [36] | Haenel [37] |
|----------------|--------------|----------------|------------------|-------------|
| Baja entalpía | < 90[°C] | < 125[°C] | < 100[°C] | < 150[°C] |
| Media entalpía | 90 – 150[°C] | 125 – 225[°C] | 100 – 200[°C] | - |
| Alta entalpía | > 150[°C] | > 225[°C] | > 200[°C] | > 150[°C] |

1.5. Potencial y desarrollo geotérmico en México

México se encuentra dentro de los diez primeros países en el mundo con mayor capacidad geotermoeléctrica instalada; específicamente, México es el cuarto lugar a nivel mundial, con 846.8 [MWe] [2], sólo por debajo de Estados Unidos, Filipinas e Indonesia. La capacidad instalada de México es incluso mayor que la capacidad instalada en los países del mundo restantes, fuera de la clasificación antes mencionada. La Figura 1.5 muestra el potencial geotérmico de Norteamérica, donde se observa el enorme potencial de la región noroeste de México

Actualmente, México tiene cuatro centrales geotermoeléctricas nacionales, operadas por la Comisión Federal de Electricidad (CFE), mostradas en la Tabla 1.2; la Figura 1.6 ilustra la capacidad total mundial instalada hasta el año 2012 y la adicionada en 2013.

Una de las consecuencias de la Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética, y la Ley de Energía Geotérmica, es la concesión que se hace a empresas privadas para operar y ser propietarios de campos geotérmicos. Como consecuencia de lo anterior, y en base al antiguo marco regulatorio, Grupo Dragón es la primer empresa privada en operar una central geotermoeléctrica. Este proyecto, denominado Domo San Pedro, ubicado en el estado de Nayarit, cuenta con dos unidades de 5 [MW] cada una y opera desde febrero de 2015 [38].

A partir de las prospectivas realizadas por empresarios (en México y el mundo), se proyecta un conjunto de soluciones y propuestas de proyectos geotérmicos principalmente en Baja California, Jalisco, Michoacán, Nayarit y Puebla [39]. La Figura 1.7 muestra la relevancia de cada uno de los estados mencionados.

Tabla 1.2: Centrales geotermoeléctricas nacionales. Adaptada de [38].

| Nombre | Ubicación | Inicio de operaciones | Capacidad efectiva | Número de unidades |
|-------------------|---------------------|-----------------------|--------------------|--------------------|
| Cerro Prieto | Baja California | 1973 | 570 [MW] | 13 |
| Los Azufres | Michoacán | 1982 | 218.4 [MW] | 15 |
| Los Humeros | Puebla | 1991 | 68.6 [MW] | 5 |
| Las Tres Vírgenes | Baja California Sur | 2001 | 10 [MW] | 2 |

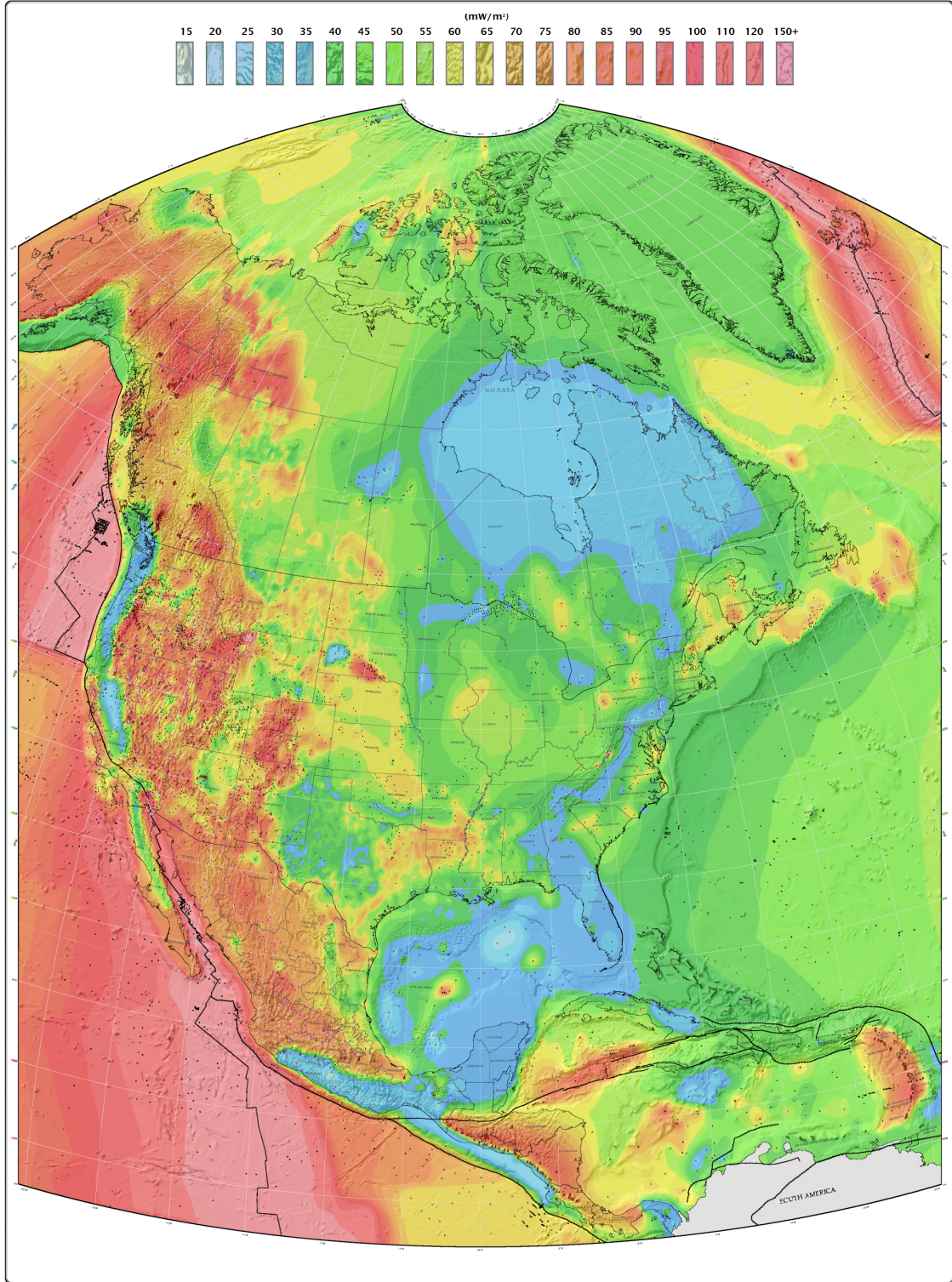


Figura 1.5: Mapa geotérmico de Norteamérica. Adaptado de [33].

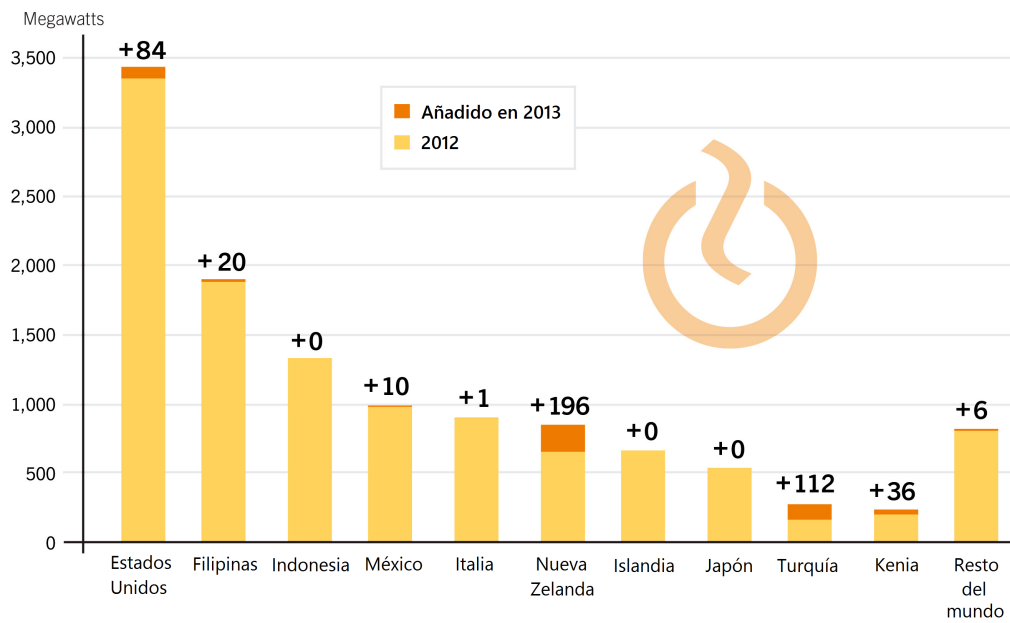


Figura 1.6: Capacidad geotermoeléctrica mundial instalada, 2014. Adaptada de [39].

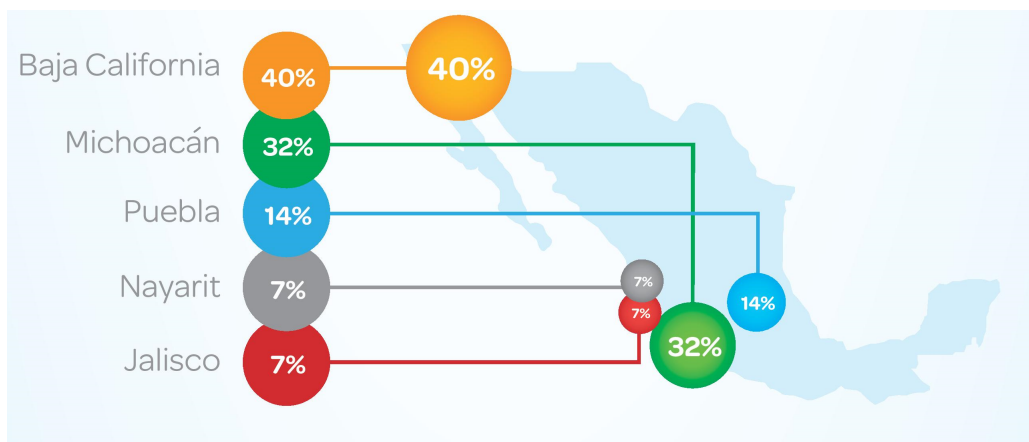


Figura 1.7: Geografía potencial de desarrollos geotérmicos en México [39]

1.6. Relevancia económica de la explotación geotérmica

El tiempo que le ha tomado a la humanidad duplicar su población ha disminuido drásticamente; en 1850, con una población estimada de 1,000 millones de personas, tomó aproximadamente 80 años para que ésta se duplicara. En el 2011, la población mundial llegó a 7,000 millones de personas; actualmente se estima que esta cifra llegará a 8,000 millones en 2024 [40], [41].

Las cifras anteriores, alarmantes, muestran que los requerimientos energéticos del mundo son cada vez mayores. De hecho, desde hace más de una década, autores observaron la relación existente entre el consumo de energía y el bienestar, desarrollo humano e ingresos per cápita [26]. Por lo tanto, mientras mayor sea la tasa de crecimiento de la población, mayores serán los requerimientos energéticos per cápita.

La Organización de las Naciones Unidas (ONU), con la pretensión de integrar las características del bienestar individual de las personas a la evaluación de crecimiento de los países, desarrolló el Índice de Desarrollo Humano (IDH) como medida de bienestar humano. Considera, entre otras cosas, la esperanza de vida, mortalidad, natalidad, ingresos, salud, reconocimiento y condiciones de vida.

A partir de datos generados por BP y la ONU ([1], [42]), se realizó la Figura 1.6. Se puede observar que dentro de los países con consumo energético total similar al de México, sólo Ucrania y Brasil tienen un IDH inferior; por otro lado, Argentina, quien lidera el IDH en Latinoamérica, se encuentra profundamente rezagado respecto a países de Europa. En otro análisis, al comparar a Estados Unidos y China, los dos países con mayor consumo energético del mundo, la diferencia de IDH es abismal.

Este hecho pone en evidencia la necesidad de garantizar la generación eléctrica y al mismo tiempo, promover condiciones para el desarrollo humano; por lo anterior, el desarrollo de proyectos geotermoeléctricos resulta una opción a considerar dentro de las energías renovables con mayor potencial en México.

Por otro lado, alrededor del mundo, cerca de la mitad de todas las centrales geotermoeléctricas están localizadas en terrenos gubernamentales, lo que implica generación de utilidades para el Estado. En el caso de la generación de empleo, diversos perfiles son solicitados desde el diseño hasta la puesta en marcha de la planta [43].

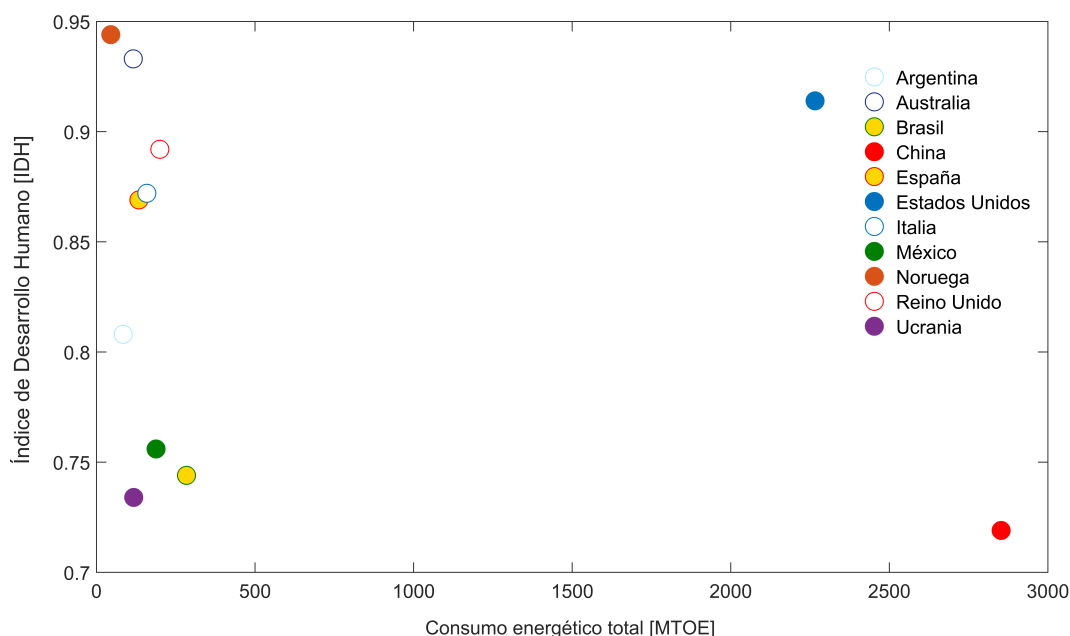


Figura 1.8: Consumo energético total e Índice de Desarrollo Humano (IDH), 2013

Finalmente, en términos de la rentabilidad de proyectos geotérmicos, la vida media común de las centrales geotermoeléctricas del mundo está generalmente estimada entre 25 y 30 años. Este periodo se proyecta como plazo último para la recuperación de la inversión y permite, una vez finalizado este periodo, la evaluación de la renovación de los elementos superficiales de la planta; sin embargo, este periodo no limita necesariamente la continuación de la producción económica, ya que además de Larderello, otras centrales longevas son Wairakei y Los Géiser [16].

1.7. Impacto ambiental

La Tabla 1.3 muestra, de manera general, las consecuencias relacionados al uso de la energía geotérmica, principalmente en la generación de potencia eléctrica. Su impacto, así como probabilidad de ocurrencia y severidad son consideradas.

Uno de los riesgos económicos y ambientales de la geotermia es la posibilidad de la sobreexplotación del agua geotérmica, lo que implica gastos en la inyección de agua de realimentación al pozo [44].

Tabla 1.3: Probabilidad y severidad de impacto ambiental potencial. Adaptada de [45].

| Impacto | B = Bajo, M = Moderado, A = Alto | |
|---------------------------------|----------------------------------|----------------------------|
| | Probabilidad de ocurrencia | Severidad de consecuencias |
| Polución del aire | B | M |
| Polución del agua | M | M |
| Contaminación de suelo | B | M |
| Hundimiento del terreno | L | M a A |
| Ruido | A | B a M |
| Explosión de pozo | B | B a M |
| Invasión de zonas arqueológicas | B a M | M a A |
| Problemas sociales | B | B |
| Contaminación térmica/química | B | M a A |
| Desecho de sólidos | M | M a A |

A pesar de que las emisiones de CO_2 en una central geotermoeléctrica son menores que las generadas en una central convencional de gas o carbón, y que para ciclos binarios éstas emisiones sean prácticamente nulas, el desarrollo de proyectos geotérmicos no implica la inexistencia de riesgos para el ambiente [44].

En términos del uso de suelo, si se considera que en promedio una central geotermoeléctrica emplea cerca de $404 [m^2]$ de construcción por cada [GWh], éstos resultan marginales en comparación con los $3,632 [m^2]$ que una central termoeléctrica de carbón requiere para producir la misma cantidad de energía [46].

Por otro lado, el desarrollo inicial de una central geotermoeléctrica incluye la exploración y perforación, elemento que, sin duda, representa el proceso con mayor complejidad técnica, no sólo en la operación, sino en el transporte de maquinaria e infraestructura temporal como construcción de vías, accesos y caminos.

En la operación de las centrales geotermoeléctricas, otro elemento asociado es la contaminación visual y auditiva; sin embargo, en algunas centrales geotermoeléctricas, como Los Azufres, se prevé esta situación con la mimetización de los vaporductos y la instalación de silenciadores en los pozos geotérmicos.

Un factor relativamente benigno es que los límites en cuestión de legislación ambiental no son tan restrictivos como en las plantas que utilizan hidrocarburos; de hecho, el fluido geotérmico, dependiendo de sus características, además de ser reinyectado al yacimiento, puede ser procesado para su potabilización o extracción de minerales y sales [29].

Finalmente, una de las consecuencias más notables, pero a veces inadvertida, es la inducción de *microsismos* relacionados con la explotación geotérmica y la reinyección de pozos; sin embargo, a pesar de que se encuentran documentados, se afirma que el riesgo de ocurrencia de sismos tiene más probabilidades de dañar a las instalaciones geotérmicas, que la la operación de éstas sobre el incremento de la ocurrencia de sismos [28].

1.8. Conclusiones

El desarrollo de la geotermia en México tiene un gran potencial no sólo técnico, sino que históricamente ha demostrado estar en la vanguardia. México no sólo fue uno de los primeros países en explotar la energía geotérmica, sino que a pesar de múltiples factores, sigue manteniéndose en los países con mayor capacidad instalada.

Por lo anterior, si se sabe del potencial geotérmico, resulta indispensable que se explote en mayores regiones, no sólo para generación de potencia eléctrica acoplada a la red, sino con fines de generación local y usos directos. Este último hecho es una de las motivaciones del CBEI-iiDEA®^(R), del cual se hará una disertación en el Capítulo 2.

Página intencionalmente en blanco

Capítulo 2

Ciclo Binario de Evaporación Instantánea CBEI-iiDEA®

2.1. Introducción

Como se comentó en la subsección 1.4.4, la energía geotérmica de alta entalpía es el tipo de recurso geotérmico más común en la producción de energía eléctrica, sin embargo, existen los llamados *proyectos de menor escala* que emplean, por lo general, energía geotérmica de baja entalpía. A pesar de lo anterior, no existe una única definición; algunos autores consideran *proyecto geotérmico para menor escala* a aquél que tiene una producción neta menor a 5 [MWe] [47]; otros lo consideran de ese modo cuando se encuentra en un rango de los 100 a los 1,000 [kWe] [48], [49].

El propósito de los proyectos de menor escala es la generación fuera de la red eléctrica donde esta generación local y remota, pueda abastecer a comunidades rurales en países en desarrollo. Un ejemplo de esto es la estimación de que una planta remota de 100 [kWe] puede abastecer desde 100 a 500 personas, y como consecuencia, una planta de 1,000 [kWe] podría abastecer desde 1,000 a 5,000 personas [50].

El CBEI-iiDEA® es un ciclo de generación de potencia Desarrollado por el Grupo iiDEA®, del II de la UNAM, el cual, propone una solución a la generación de electricidad fuera de la red con un sistema modular resultante de la modificación de un Ciclo Binario Convencional (CBC) y la aplicación de las técnicas de evaporación instantánea empleada en los ciclos geotermoeléctricos a condensación.

En este capítulo se abordarán sus características más relevantes con el fin de justificar los sensores a emplear, así como su localización dentro del sistema experimental actual.

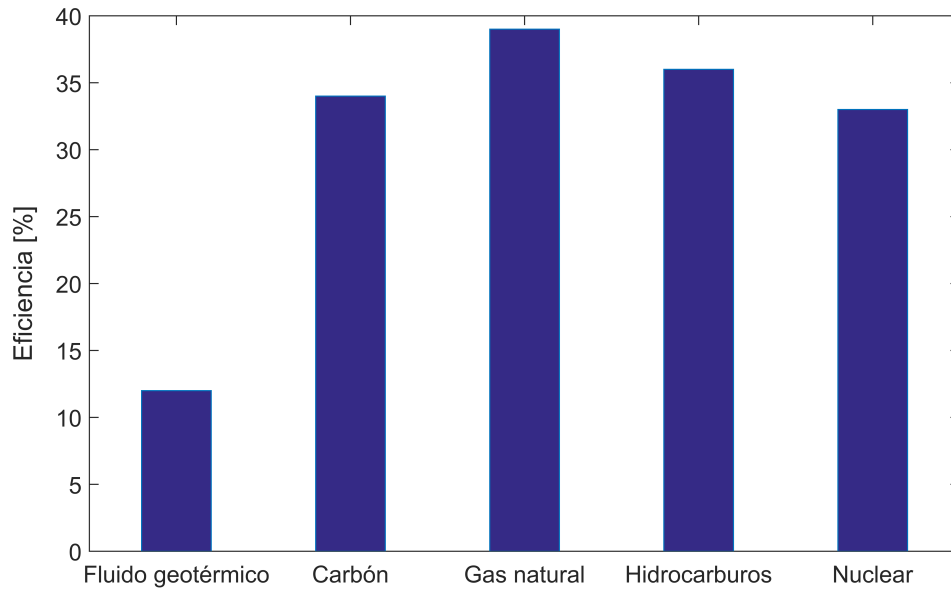


Figura 2.1: Eficiencia térmica de plantas de generación de potencia. Adaptado de [54].

2.2. Generación de potencia eléctrica con energía geotérmica

El principio de generación de potencia eléctrica a partir de recursos geotérmicos es similar al de los ciclos termodinámicos empleados en centrales termoeléctricas convencionales ya que involucra un generador de vapor, turbina de vapor y condensador [51].

Uno de los elementos determinantes de las centrales geotermoeléctricas es el Factor de Planta asociado. Éste se define, de manera concreta, como la generación real producida en un año, comparada con la generación teórica que se produciría en ese mismo periodo con la planta operando a su máxima capacidad [52]. Este concepto no es único de las plantas geotermoeléctricas, es aplicable a cualquier planta de generación de potencia o planta que involucre un proceso industrial, sin embargo, es importante mencionarlo porque el factor de planta de las centrales geotermoeléctricas es de los más altos (hasta 95 %) [53], siendo las centrales nucleoeeléctricas sus más cercanas competidoras.

Sin embargo cuando se compara su eficiencia térmica con centrales de generación eléctrica convencionales (gas, hidrocarburos, carbón) y nucleares, ésta es reducida [54]. La Figura 2.1 muestra una comparativa general entre la eficiencia térmica de una central geotermoeléctrica de ciclo binario y centrales convencionales y nucleares.

De manera elemental, las etapas en la explotación de recursos geotérmicos para fines de generación eléctrica son las siguientes [55]:

Determinación de gasto y temperatura Con el fin de estimar la energía producida a partir del pozo, es necesario conocer la temperatura y gasto del fluido geotérmico debido a que estos dos factores son determinantes en la generación de potencia eléctrica.

Selección de planta de generación y fluido de trabajo Existen diferentes tipos de plantas geotermoeléctricas; cada una de ellas tiene un principio de operación y fluido de trabajo, así como requerimientos para el fluido geotérmico a emplear.

2.3. Centrales geotermoeléctricas convencionales

De manera general, las centrales geotermoeléctricas pueden ser divididas en dos grupos a partir de su principio general de operación: por ciclo de vapor o ciclo binario. Las primeras son generalmente empleadas con recursos de alta entalpía; las segundas, para baja entalpía [56].

Con el propósito de establecer un marco de referencia respecto a los ciclos de generación de potencia actualmente empleados, se abordan los más representativos a partir de sus características fundamentales.

2.3.1. Ciclo a contrapresión

Mostrado en la Figura 2.2, este ciclo emplea fluido geotérmico como fluido de trabajo; una vez que se ha extraído, éste ingresa a un separador, para después introducir en la turbina el vapor obtenido; el exceso de vapor en esta última etapa es descargado hacia la atmósfera. Un *separador*, en términos generales, es un dispositivo que separa las fases de una mezcla con el fin de emplear alguna de ellas en un propósito específico [57]. La separación, como proceso termodinámico, es modelado como proceso isobárico [58].

El ciclo a contrapresión tiene como principal ventaja el hecho de que, al no necesitar condensador y equipos auxiliares, su costo es reducido. Por otro lado, si el yacimiento geotérmico consiste de vapor saturado, se puede evitar el uso del separador al guiar al vapor directamente a la turbina, aunque esta práctica no es recomendable; cuando el ciclo se opera de esta forma recibe el nombre de *ciclo de vapor seco* [59].

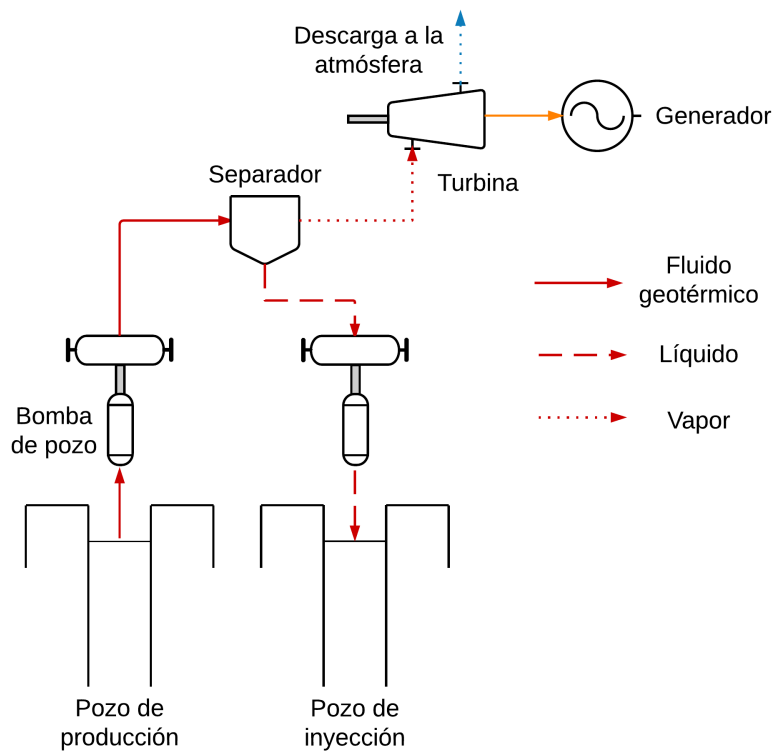


Figura 2.2: Ciclo a contrapresión o de vapor seco. Adaptado de [60].

A pesar de que en el mundo sólo existen dos campos geotérmicos de gran escala (Lardellello y Los Géiser), en 2011 existían 71 unidades que operaban bajo este principio, lo que representaba el 12% de todas las centrales geotermoeléctricas y el 27% de toda la capacidad geotérmica mundial instalada (2,893 [MW]) [58].

Históricamente, las centrales de vapor seco fueron las primeras en ser desarrolladas comercialmente; de hecho, el motor de vapor creado por Piero Ginori, de 15 [kW], operaba con vapor seco [58].

2.3.2. Ciclo a condensación

De forma general, este ciclo retoma los principios de un ciclo a contrapresión, con la diferencia de que el vapor de descarga de la turbina es condensado y reinyectado al pozo geotérmico [60]. Este principio de operación es el más común en las centrales geotermoeléctricas actuales [61] e incluye dos *variaciones* a partir de la inclusión del fenómeno de la evaporación instantánea, también conocido como *flash*.

La evaporación instantánea se puede lograr a partir de dos procesos: el primero consiste en aumentar la temperatura de un fluido en fase líquida de forma súbita manteniendo una presión constante; en el segundo, se lleva al fluido a condiciones de alta presión y temperatura para después disminuir rápidamente su presión [62]. En las centrales geotermoeléctricas se aplica el segundo principio mediante la instalación de placas orificio o válvulas de compuerta.

El proceso de evaporación instantánea es modelado como un proceso isoentálpico ya que es esencialmente adiabático y sin realización de trabajo [58].

Ciclo a condensación con un *flash*

Al extraer el fluido geotérmico del pozo, éste ingresa a un separador, donde la fracción de vapor extraída es introducida a la turbina y la fracción restante de líquido es reinyectada al pozo. El sistema de enfriamiento puede ser operado a partir de agua o aire, sin embargo, es común emplear torres de enfriamiento. La Figura 2.3 muestra este ciclo de generación.

Dado que en las centrales que emplean un ciclo a condensación es necesaria la inclusión de sistemas de enfriamiento, el costo no es el único factor a considerar, sino también el uso de suelo; en plantas con este ciclo la superficie de construcción es cercana al doble de la necesaria para plantas con ciclo a contrapresión [24].

Ciclo a condensación con dos *flash*

Como se observa en la Figura 2.4, la peculiaridad de este ciclo es que a partir de una primera separación, la fracción de líquido extraída es nuevamente separada, extrayendo más vapor.

Aunque de forma teórica este proceso podría repetirse de forma indefinida, no resulta una opción económicamente viable al ser necesario que en cada etapa de *flash* se instalen placas orificio y separadores [62].

Este ciclo presenta un aumento de hasta 25% en la potencia generada respecto al ciclo con un *flash* [58]. En agosto de 2011, se tenía un registro mundial de 59 unidades con dos *flash*, lo que representaba el 10% de todas las centrales geotermoeléctricas [58].

Finalmente, uno de los requerimientos fundamentales de este ciclo es la inclusión de una turbina de admisión doble o dos turbinas, con el propósito de operar con vapor a alta y baja presión, resultado de los dos procesos de separación [58].

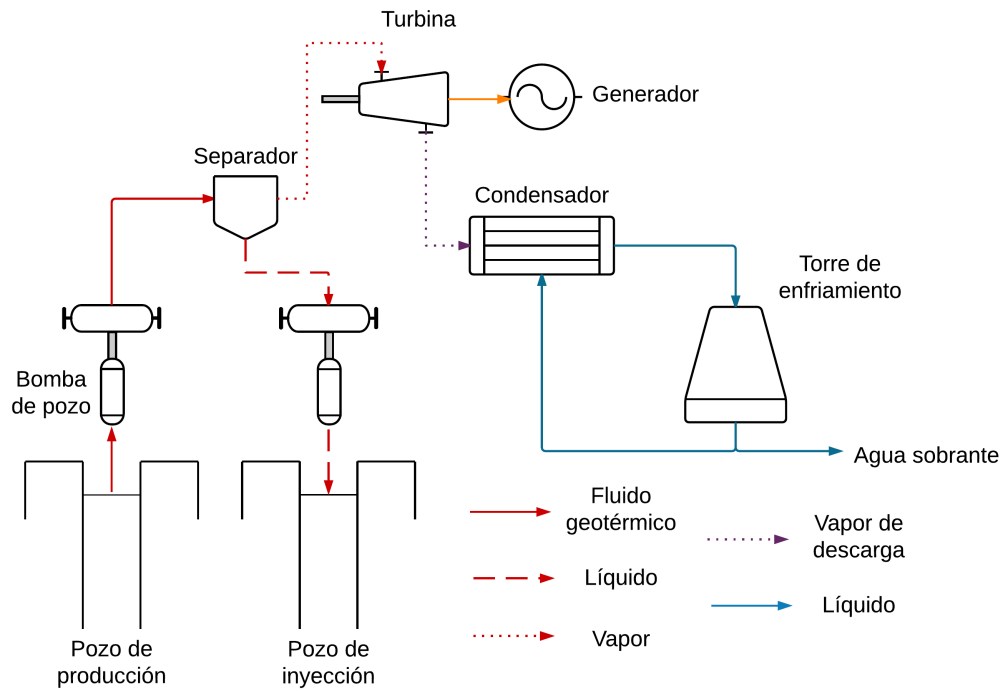


Figura 2.3: Ciclo a condensación con un *flash*. Adaptado de [60].

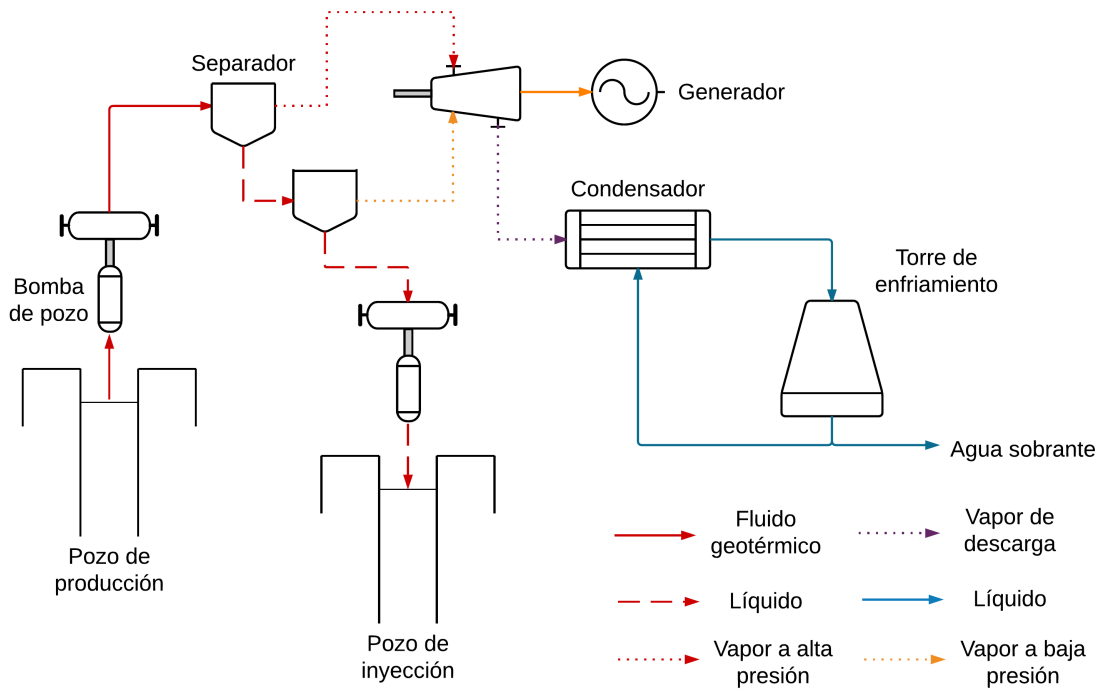


Figura 2.4: Ciclo a condensación con dos *flash*. Adaptado de [60].

2.3.3. Ciclos binarios

Este tipo de plantas son las más usadas en el mundo, con más de 235 unidades en operación en el mundo (40% del total de centrales geotermoeléctricas) y una generación estimada de 708 [MW] en 2011, en 15 países [58]. Un hecho notable es que a pesar de los datos anteriores, su generación representa alrededor del 6.6% de la potencia total mundial.

En un CBC (mostrado en la Figura 2.5) el fluido geotérmico es empleado para transferir calor a un segundo fluido, llamado *fluido de trabajo*; éste es empleado en el proceso operativo dentro de un segundo circuito cerrado, donde se introduce a la turbina. El fluido geotérmico y el fluido de trabajo están aislados entre sí (cada uno está en un circuito diferente), y la única interacción entre ellos es a través de un intercambiador de calor. En este tipo de ciclos, el fluido geotérmico, una vez que ha cedido calor al fluido de trabajo, es reinyectado al pozo geotérmico [56].

Estos ciclos pueden generar potencia eléctrica a partir de fluido geotérmico a temperaturas relativamente bajas (hasta 73 [°C]) [54], sin embargo, es común el uso de recursos geotérmicos de hasta 150 [°C] con ciclos binarios de generación menor a 10 [MW] [55].

Los ORC, caso caso particular de los CBC, emplean un fluido de trabajo orgánico, el cual tiene un punto de ebullición menor al del agua y una alta masa molecular, por lo que al evaporarse a una temperatura menor, los requerimientos energéticos del ciclo disminuyen [19].

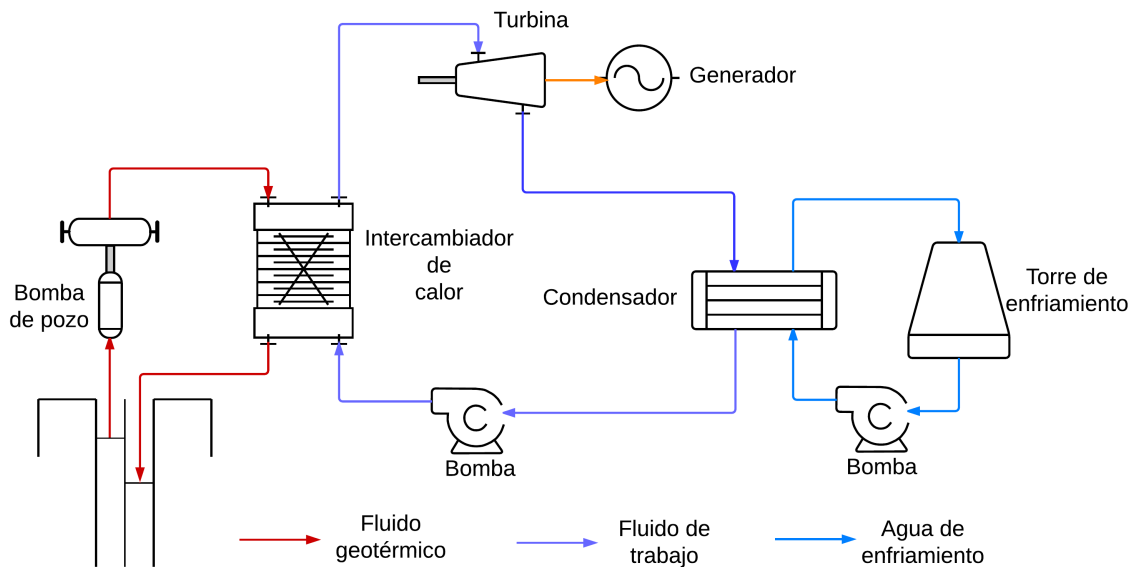


Figura 2.5: Ciclo Binario Convencional (CBC). Adaptado de [60].

2.4. Ciclo Binario de Evaporación Instantánea CBEI-iiDEA®

El CBEI-iiDEA® es un ciclo de generación de potencia eléctrica orientado a la explotación de recursos geotérmicos de media y baja entalpía.

A partir de la modificación de un CBC, el CBEI-iiDEA® tiene el propósito de resolver algunas de sus deficiencias y proponer un nuevo sistema de generación de vapor. El elemento crítico de los CBC que toma el CBEI-iiDEA® como motivación, es el hecho de que en los ciclos geotermoelectrónicos a contrapresión y a condensación el fluido geotérmico está en contacto directo con el intercambiador de calor, evaporador, precalentador y turbina. Lo anterior implica la eventual corrosión y formación de incrustaciones, por lo tanto, costos de mantenimiento.

Dentro de las características notables de este ciclo se encuentra el uso de un intercambiador de calor de placas, una placa orificio (o válvula de estrangulamiento), un separador ciclónico, y una micro turbina radial de altas revoluciones.

El CBEI-iiDEA®, al ser un ciclo binario y emplear un intercambiador de calor de placas, minimiza el problema de corrosión e incrustaciones en equipos, además de disminuir tiempos de mantenimiento, lo que inevitablemente converge en una reducción de costos significativa.

El CBEI-iiDEA® se detalla a partir de sus elementos constitutivos más relevantes en la sección 2.5 y se ilustra en la Figura 2.6.

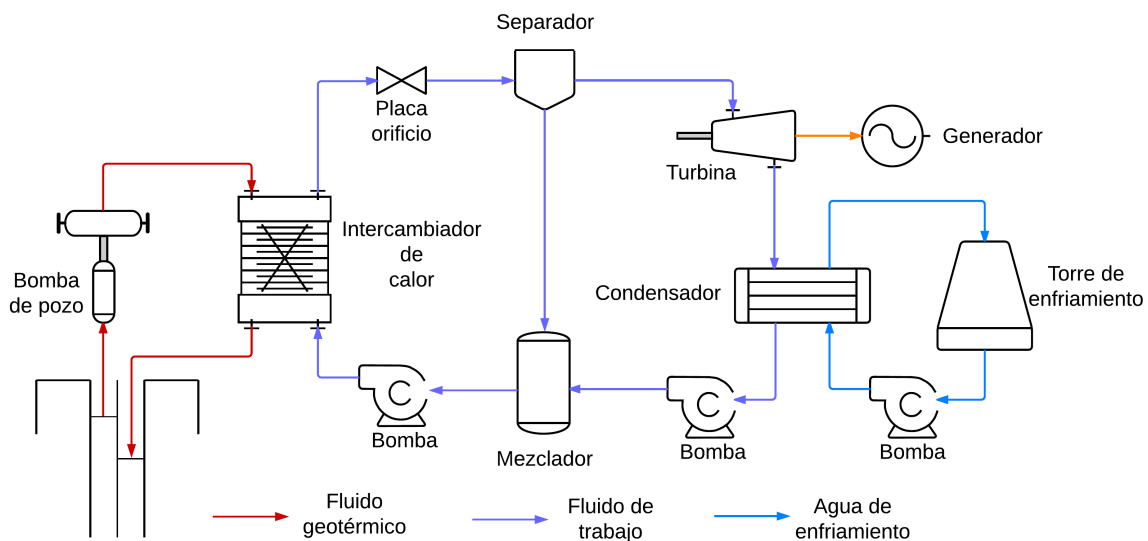


Figura 2.6: Ciclo Binario de Evaporación Instantánea iiDEA®. Adaptado de [63].

2.5. Descripción general de los elementos del CBEI-iiDEA®

2.5.1. Intercambiador de calor

A partir de los requerimientos térmicos del CBEI-iiDEA® es necesario que el intercambiador de calor empleado tenga un acercamiento estrecho y una caída de presión mínima. En el Grupo iiDEA® se desarrolló el diseño del intercambiador de placas específico para este fin que además de cumplir con las condiciones anteriores, minimiza los tiempos de mantenimiento así como su impacto, ya que esta tarea se reduce a la limpieza y reemplazo periódico de las placas [64].

2.5.2. Placa orificio

Con la primera versión del sistema de Instrumentación - abordado en la Introducción de este trabajo - el Grupo iiDEA® realizó experimentos sobre la caracterización de una válvula de compuerta, etapa preliminar al diseño final de placa orificio con brida roscable [62].

2.5.3. Separador de flujos

A partir de la primera versión del sistema de Instrumentación, los resultados generados contribuyeron al diseño del separador de flujos, generando un separador ciclónico vertical ya que ofrece una alta calidad en el vapor generado, así como reducidas dimensiones [57].

2.5.4. Turbina

En diversos trabajos del Grupo iiDEA® se desarrolló el diseño una micro turbina radial de altas revoluciones procesada a través de manufactura aditiva [65]-[67].

2.6. Estados termodinámicos del CBEI-iiDEA®

Con el fin de identificar la relevancia de los puntos termodinámicos del CBEI-iiDEA® en el sistema de instrumentación, se establecen como puntos prioritarios aquellos que forman parte de los dispositivos que integran el sistema de generación de vapor (intercambiador de calor de placas, placa orificio y separador de flujos).

La Figura 2.7 muestra el Diagrama Temperatura - Entropía del CBEI-iiDEA®; por otro lado, la Figura 2.8 muestra la localización de los puntos anteriores en el ciclo.

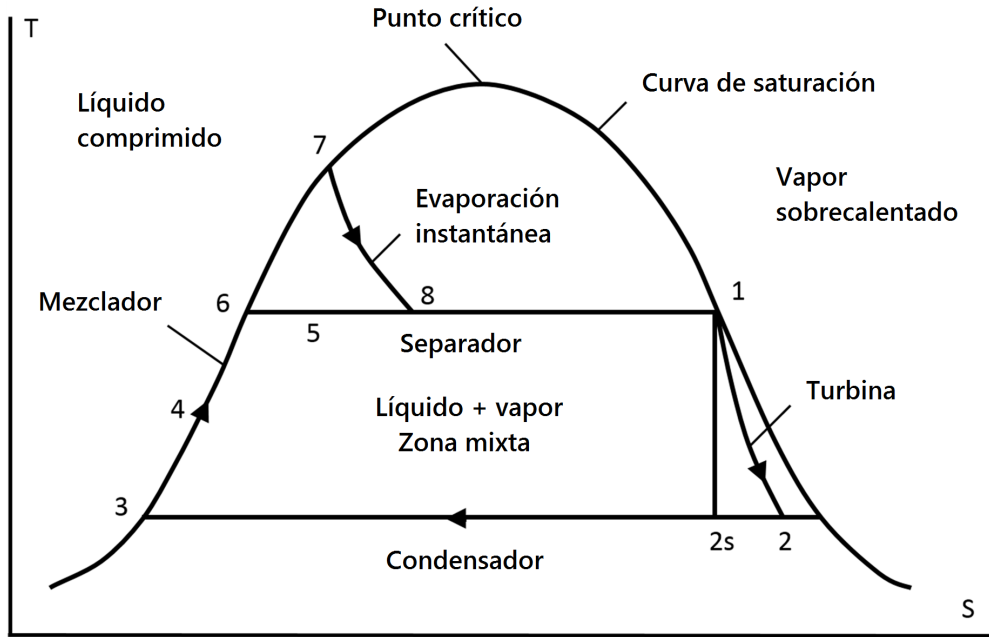


Figura 2.7: Diagrama T-S de CBEI-iiDEA[®]. Adaptado de [63].

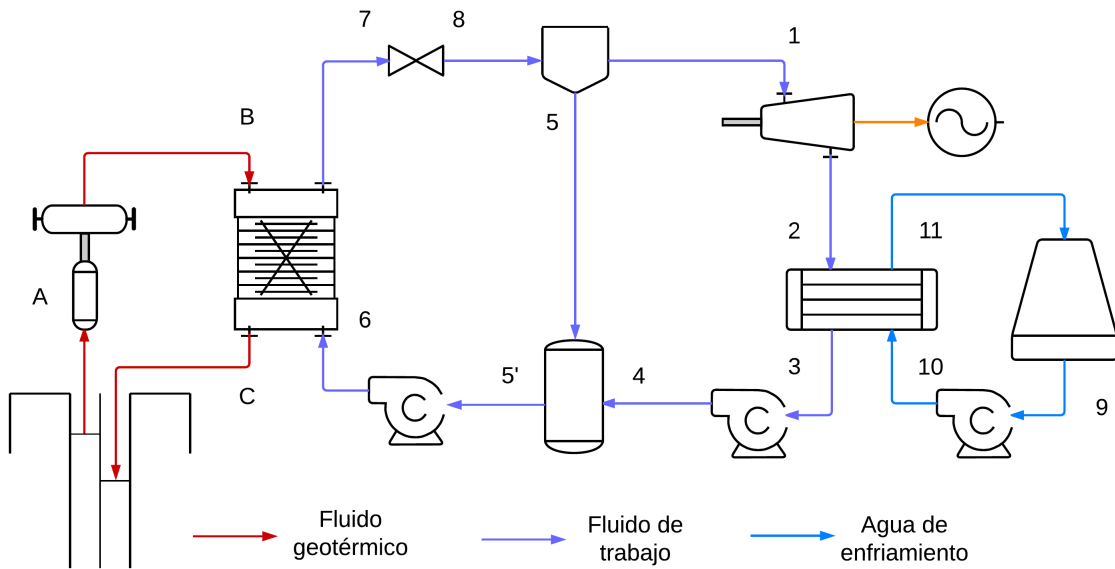


Figura 2.8: Estados termodinámicos de Ciclo Binario de Evaporación Instantánea CBEI-iiDEA[®]. Adaptado de [63].

2.7. Sistema de generación de vapor

Como se comentó en la sección 2.6, se le dará prioridad a los estados pertenecientes al sistema de generación de vapor (mostrado en la Figura 2.9) con el fin de evaluar las siguientes características:

- Evaluación de acercamiento (*pinch point*) de intercambiador de calor
- Caracterización de caída de presión en placa orificio
- Evaluación de condiciones operacionales de separador ciclónico

En un análisis teórico realizado mediante el *software* REFPROP 9.1, el Grupo iiDEA[®] obtuvo una serie de condiciones para un prototipo experimental con generación neta de 1 [kWe] [63]. Tomando este análisis como punto de partida, se tienen las condiciones de operación teóricas mostradas en la Tabla 2.1, así como las condiciones teóricas máximas de operación, en la Tabla 2.2.

Finalmente, la generación neta teórica de 1 [kWe] para este prototipo se logra con un fluido geotérmico con temperatura de 140 [°C] y una temperatura ambiente de 25 [°C] [63], condiciones que se desea replicar y que se abordan en la siguiente sección (2.8).

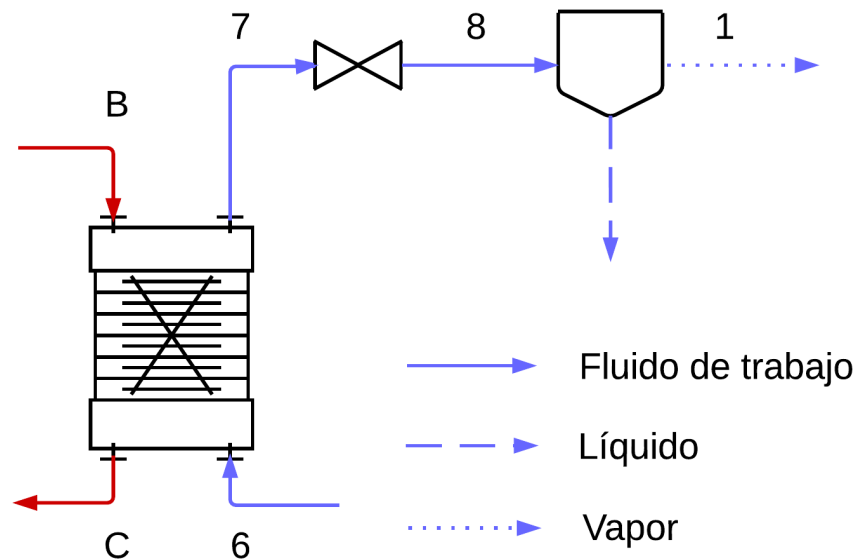


Figura 2.9: Sistema de generación de vapor de CBEI-iiDEA[®]. Adaptado de [57].

Tabla 2.1: Condiciones teóricas de sistema de generación de vapor. Adaptada de [68].

| Dispositivo | Estado | Presión [kPa] | Temperatura [°C] |
|-------------------------|--------|------------------|---------------------|
| Intercambiador de calor | B | 412 | 140 |
| | C | 362 | 106.7 |
| | 6 | 487 | 103.7 |
| Placa orificio | 7 | 332 | 137 |
| Separador | 8 | 130 | 107.1 |
| | 1 | 130 | 107.1 |

Tabla 2.2: Condiciones máximas de operación

| | Valor teórico máximo | Valor teórico mínimo |
|------------------|----------------------|----------------------|
| Temperatura | 140 [°C] | 25 [°C] |
| Presión absoluta | 487 [kPa] | 10 [kPa] |

2.8. Sistema experimental de generación de vapor

Con el fin de desarrollar las pruebas experimentales en laboratorio del CBEI-iiDEA[®], el Grupo iiDEA comenzó la fabricación de un primer prototipo integrado por los elementos mostrados en la Figura 2.10, denominado Sistema Experimental de Generación de Vapor [62], con el objetivo de evaluar los equipos mencionados en la sección anterior (2.7).

El principio de funcionamiento se basa en el la operación fundamental del CBEI-iiDEA[®], con la restricción de que el fluido geotérmico es simulado con agua y un calentador doméstico; por otro lado, como fluido de trabajo se utilizó agua [62].

Por otro lado, debe notarse la inclusión de un radiador, así como el establecimiento de dos estados adicionales, U y V ; la razón de emplear un radiador es que no se tiene acoplado al ciclo el sistema de enfriamiento por lo que para mantener el ciclo en operación continua es necesario disminuir la temperatura del fluido de trabajo [62]. Finalmente, al no estar la turbina dentro del ciclo, el vapor generado se descarga a la atmósfera.

Como consideración final, se mantiene la nomenclatura empleada en los estados termodinámicos, con la excepción de la adición de los estados U y V antes mencionados.

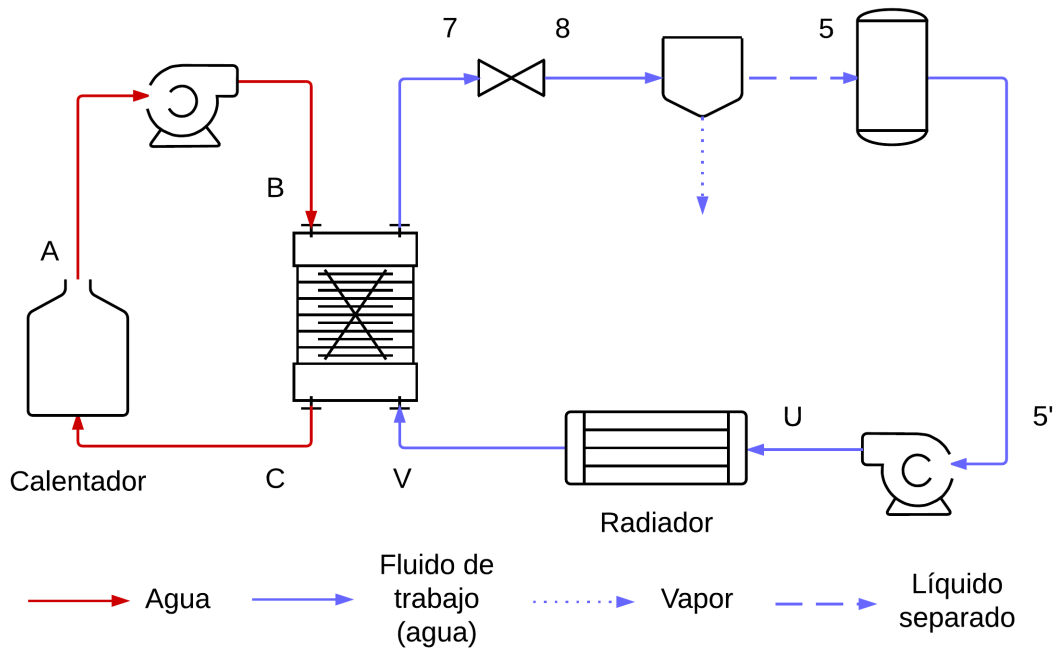


Figura 2.10: Sistema experimental de generación de vapor. Adaptado de [62].

2.9. Conclusiones

Al introducir al lector a las tecnologías de generación de potencia eléctrica empleadas en centrales geotermoeléctricas se resalta la importancia del CBEI-iiDEA[®] como desarrollo tecnológico emergente. El CBEI-iiDEA[®] propone una mejora a los ciclos existentes y tiene como objetivo fundamental el aprovechamiento de geotermia de media y baja entalpía con fines de generación local.

Por otro lado, se establecieron las condiciones teóricas de operación, elementos determinantes en la selección y localización de sensores, desarrollada en el Capítulo 4. En el Capítulo 3 se desarrollará la teoría básica de la Ingeniería de confiabilidad como herramienta en el diseño final del sistema de instrumentación.

Página intencionalmente en blanco

Capítulo 3

Fundamentos de confiabilidad y tolerancia a fallas

3.1. Introducción

Los conceptos de confiabilidad y seguridad tienen una relevancia mayor en sistemas tecnológicos, comerciales e industriales. En el caso de un producto o sistema, de todas las características deseadas de operación, se propone que el sistema sea estable y que en caso de falla, sea seguro. Ésto es especialmente deseado cuando existe algún operador o usuario final que haga uso del sistema diseñado, sin embargo, el análisis de confiabilidad es una herramienta que no sólo previene pérdidas humanas, sino también bienes materiales y forma parte de los extensos requerimientos, necesidades del desarrollo de productos tecnológicos y de vanguardia.

La importancia de los sistemas confiables, así como el manejo de riesgos, tienen un lugar determinante en cualquier sistema y/o compañía. De hecho, no es poco común que en algunas de ellas exista un departamento especializado en Ingeniería de Fiabilidad. La razón de que esta área exista no sólo se debe al hecho de regímenes comerciales o legales, sino que aspectos financieros, de seguridad del mercado y clientes, son tomados en cuenta.

Con el fin de aumentar la fiabilidad de un sistema, las técnicas de Ingeniería de Fiabilidad y Manejo de Riesgos son usadas en al menos una de las siguientes áreas [69]:

Finanzas Los costos de operación se pueden reducir notablemente si en la etapa de diseño se considera el uso de técnicas de Ingeniería de Fiabilidad. A pesar de que su verdadera utilidad se encuentre en esta etapa, previa a la de operación y mantenimiento, es posible aplicar ciertas técnicas en algunos sistemas que se encuentren en alguna de estas últimas dos etapas.

Impacto en la empresa El hecho de que un sistema no provoque accidentes o presente averías, implica que los clientes podrán confiar en la marca de una compañía, asegurando una carpeta de clientes sólida y por lo tanto, ventas y utilidades. En caso de un accidente, las consecuencias pueden implicar cambios en Consejos y Mesas Directivas, caídas en el valor de acciones, pérdidas por seguros de gastos y la pérdida de confianza del mercado.

Impacto en las personas Las consecuencias de la falla de un sistema pueden no limitarse a un sector local, sino que la propagación de dicha falla puede afectar comunidades completas.

Impacto en el ambiente En sistemas que trabajan con procesos y productos químicos, la minimización del impacto ambiental es fundamental. Por lo anterior, es inadmisibles la emisión de descargas no controladas a la atmósfera, suelo o agua.

Servicio al cliente Las empresas que tienen ciertos estándares en Atención y Servicio al Cliente pueden encontrarse en serios problemas en caso de que una falla ocurra y deban invertir tiempo y esfuerzos en el *control de daños*. Este aspecto no sólo se limita a la imagen pública ante la prensa o las compensaciones económicas de empleados internos, sino a posibles multas como resultado de un mal manejo de estándares.

Legislación En ciertas legislaciones existen normas o estándares sobre cierto producto, manejo o proceso; por otro lado, a pesar de que existan casos donde ninguno de estos estándares exista en alguna legislación aplicable, la empresa puede sufrir acusaciones de negligencia.

Seguros La adquisición de seguros es una práctica común, sin embargo, existen ciertos eventos que no son cubiertos por las compañías aseguradoras, o en caso afirmativo, las pólizas y costos adicionales son extremadamente altos. De esta forma el análisis de riesgo y confiabilidad resulta una opción atractiva y económica.

A pesar de lo anterior, es importante destacar que ningún sistema se encuentra exento de sufrir alguna avería y que el momento exacto de la falla es impredecible, sin embargo, las técnicas y modelos matemáticos empleados aumentan la confiabilidad de diseño, incrementando la garantía, certeza y valor agregado del producto o sistema.

En este capítulo se hace una disertación general sobre los sistemas tolerantes a fallas, con el fin de establecer las bases teóricas para el análisis del sistema de instrumentación tolerante a fallas propuesto.

3.2. Riesgo y Peligro

Existen situaciones que además de considerar el Análisis de Confiabilidad, toman como elemento complementario el Análisis de Riesgo. Dicho enfoque, así como la influencia humana en el sistema, está fuera del propósito de este trabajo, sin embargo, se considera importante introducir al lector en los conceptos fundamentales de esta área. Dichos conceptos permitirán establecer las bases del Análisis de Fiabilidad presentado en el Capítulo 4.

El Análisis de Riesgo incluye la posibilidad de accidentes y errores humanos. Lo anterior resulta de aceptar que, innegablemente, todo sistema es una relación máquina-humano y por lo tanto, el humano tendrá una influencia sobre la operación del sistema. De forma conceptual, la Fiabilidad Humana [*Human Reliability (HR)*] se define como “*la probabilidad de que una tarea asignada a una persona sea completada de forma exitosa, en el momento requerido del sistema en operación, dentro del intervalo requerido*” [70].

El proceso de Análisis de Riesgo es, esencialmente, una metodología aplicada con el fin de determinar qué elementos del sistema y alrededores pueden presentar comportamientos o eventos no deseados, evaluar su impacto, su periodicidad y probabilidad de ocurrencia. La metodología busca responder las siguientes preguntas [69]:

- ¿Qué puede salir mal?
- ¿Qué tan graves son las consecuencias de que salga mal?
- ¿Cuál puede ser su periodicidad?
- ¿Es aceptable su ocurrencia?

Del mismo modo, la evaluación de peligros está basada en el impacto de una falla, accidente o riesgo, en la seguridad humana. En este contexto el peligro se define como “*cualquier fuente de daño potencial físico o efecto adverso en la salud de algo o alguien, bajo ciertas condiciones de trabajo*” [71]. Por otro lado, el riesgo se define, generalmente, como “*la posibilidad de que cierto evento específico no deseado ocurra en cierto periodo bajo ciertas circunstancias*” [72].

Es importante resaltar la relación particular que existe entre estos dos últimos conceptos, y cómo es que coexisten uno con otro. El hecho de que cierto elemento sea potencialmente peligroso, no significa que sea necesariamente un riesgo, siempre que se tomen las medidas necesarias en su manejo.

La consecuencia de lo anterior es comprender que la mayor generosidad del análisis de riesgo es proveer información que pueda ser una herramienta fundamental en la toma de decisiones.

3.2.1. Identificación de riesgo

Existen tres herramientas características en la identificación de riesgos, algunas de ellas también son empleadas en alguna etapa del análisis de fiabilidad. De manera general, se presentan en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1: Herramientas de identificación de riesgos. Adaptada de [72]

| Categoría | Técnica |
|-----------|---|
| Intuitiva | Lluvia de ideas |
| | <i>FMEA</i> |
| | <i>Failure, Modes, Effects and Criticality Analysis (FMECA)</i> |
| Inductiva | <i>Event Tree analysis (ETA)</i> |
| | Listas de tareas |
| | Análisis Hombre-Máquina |
| Deductiva | <i>Fault Tree Analysis (FTA)</i> |
| | Investigación de accidentes |

3.2.2. Cuantificación de riesgo

Conceptual y cuantitativamente, el *riesgo* es una terna formada por un evento no deseado, una posibilidad o probabilidad de ocurrencia, y una consecuencia [72]. Matemáticamente puede expresarse de la siguiente forma:

$$\text{Riesgo} = \text{Probabilidad} \cdot \text{Consecuencia} \quad (3.2.2.1)$$

Sus unidades dependerán del enfoque sobre el cual se realice el análisis, donde esencialmente se encuentran las categorías de riesgo ambiental, seguridad (humana y de bienes) y sector financiero. La Tabla 3.2 muestra las unidades más comunes para estos dos últimos sectores.

Además, uno de los criterios adicionales es la Aceptación de Riesgo [69]. En él se establece la *aceptación* general de cierto riesgo, es decir, a partir de la evaluación de los riesgos existentes, se determina cuál es el mínimo nivel latente aceptable; los dos acercamientos más comunes en este criterio están basados en los principios de cuantificación previamente mencionados.

Tabla 3.2: Unidades de Riesgo (Seguridad y Finanzas. Adaptada de [72].

| Seguridad | | Financiero | |
|--------------|--|--------------|---|
| Concepto | Unidad | Concepto | Unidad |
| Consecuencia | Fatalidades | Consecuencia | Costo total [\\$] |
| Frecuencia | $\left[\frac{\text{evento}}{\text{año}} \right]$ | Frecuencia | $\left[\frac{\text{evento}}{\text{año}} \right]$ |
| Riesgo | $\left[\frac{\text{fatalidad}}{\text{año}} \right]$ | Riesgo | $\left[\frac{\$}{\text{año}} \right]$ |

En el primero de ellos se pretende concertar el máximo riesgo que puede representar cierto peligro y al que puede estar expuesto un bien o persona; en el segundo, se conviene la suma máxima posible desde el punto de vista económico y empresarial que puede ser invertida en el propósito de la evasión de un riesgo.

3.3. Atributos de Confiabilidad

Como primer acercamiento, se presentan conceptos fundamentales asociados a la confiabilidad de un sistema basados en el *árbol de confiabilidad* [73], mostrado en la Figura 3.1, con el propósito de establecer el contexto conceptual de discusiones posteriores.

Los atributos de confiabilidad más relevantes, son la fiabilidad, disponibilidad, sostenibilidad y seguridad [*Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS)*]. Los primeros dos atributos se abordarán con mayor detalle debido a que son atributos cuantitativos; por otro lado, los dos atributos finales son cualitativos.

Las características adicionales (Confidencialidad e Integridad) obedecen a la integración de seguridad en sistemas computacionales u organizacionales. Cuando a la pareja anterior se le suma la Disponibilidad, es común encontrar a la terna como *Confidentiality, Integrity, and Availability (CIA)* [74].

3.3.1. Fiabilidad (*Reliability*)

A partir de la definición cualitativa dada por la Organización Internacional de Estándares [*International Standards Organization (ISO)*], fiabilidad es “la habilidad de un elemento de desempeñar una función requerida, bajo ciertas condiciones, por un intervalo dado” [75]. Dicho de otro modo, es la capacidad de un elemento de continuar operando, conservando sus cualidades.

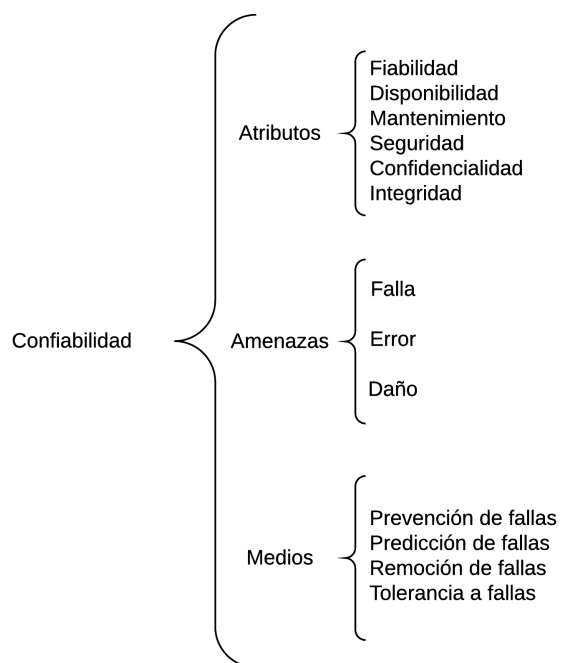


Figura 3.1: Árbol de confiabilidad. Adaptado de [73].

Como complemento a esta definición se abordan otros tres conceptos relevantes[76]: El *elemento* se trata de una unidad o estructura funcional, que puede incluir un componente, sistema, subsistema o equipo. Una *función requerida* se refiere a la tarea específica del dispositivo; las *condiciones de operación* se refieren a relaciones generalmente externas que tienen un efecto sobresaliente en la fiabilidad, ya que de acuerdo a las condiciones en que se encuentre, o los cambios que se experimenten en este sentido, será el grado de afectación que sufrirá el dispositivo.

Dentro de las condiciones de operación, se encuentran los factores naturales y los inducidos. La Tabla 3.3 muestra una serie de factores que influyen la fiabilidad de un sistema.

Otro elemento importante es el hecho de no confundir a la fiabilidad con el concepto de *confianza*. Este último término es usado por los fabricantes de dispositivos para denotar la certeza mínima con la que aseguran los datos de fiabilidad de sus productos [*Confidence Level (CL)*].

De forma cuantitativa, la fiabilidad es la probabilidad de que dicho sistema se mantenga activo y realice la tarea (misión) que le fue asignada; generalmente se denota como $R(t)$. En la subsección 3.6.7 se profundizará sobre sus características cuantitativas. Finalmente, todos los procesos de fiabilidad son dependientes del tiempo, por lo que siempre se deberá especificar el tiempo de la misión para la que fue diseñado.

Tabla 3.3: Factores ambientales que influyen la fiabilidad. Adaptada de [77].

| Natural | | Inducido |
|-----------------------|-----------------------------|------------------------|
| | Radiación electromagnética | |
| | Descargas electromagnéticas | |
| | Altas/bajas temperatura | |
| | Alta/baja presión | |
| Escarcha | | Químicos |
| Hongos | | Explosiones |
| Campo gravitatorio | | Humedad |
| Tormentas eléctricas | | Radiación nuclear |
| Contaminación de aire | | Choque térmico |
| Viento | | Contaminación espacial |
| Lluvia | | Turbulencias |
| Polvo y arena | | Humaredas |
| Nieve | | Vibraciones mecánicas |

3.3.2. Disponibilidad (*Availability*)

Se define como “la habilidad de un elemento de estar en un estado y desempeñar una función requerida bajo ciertas condiciones, en un instante dado o en cierto intervalo, asumiendo que los recursos externos necesarios son suministrados” [75]. De manera simple y cuantitativa, es la probabilidad de que un sistema esté operando correctamente y que esté disponible para desempeñar su función en un instante o intervalo requerido.

Para un sistema que no se puede reparar, la disponibilidad es equivalente a la fiabilidad. Por otro lado, para un sistema que puede ser reparado en caso de avería, existe un periodo en que no estará operando, pero el hecho de que se pueda reparar puede minimizar los efectos de la falla. A partir de esta relación, se establece que si existe reparación de un elemento, su fiabilidad no cambia, pero su disponibilidad sí [78]. De manera elemental, se puede expresar matemáticamente de la siguiente manera:

$$A(t) = \frac{\textit{Tiempo de servicio}}{\textit{Tiempo total de operación}} \quad (3.3.2.1)$$

Dentro de los sistemas de alta disponibilidad existe una clasificación establecida por Jim Gray y Andreas Reuter [79] que define clases para diferentes disponibilidades de sistemas. Dicha clasificación, útil como referencia para la realización de este trabajo, se muestra en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4: Clases de sistemas de alta disponibilidad [79]

| Tipo de sistema | Indisponibilidad [min/año] | Disponibilidad | Clase de disponibilidad |
|-------------------------|-------------------------------|----------------|-------------------------|
| Sin gestión | 50,000 | 90 % | 1 |
| Con gestión | 5,000 | 99 % | 2 |
| Bien gestionado | 500 | 99.9 % | 3 |
| Tolerante a fallas | 50 | 99.99 % | 4 |
| Alta disponibilidad | 5 | 99.999 % | 5 |
| Muy alta disponibilidad | 0.5 | 99.9999 % | 6 |
| Ultra disponibilidad | 0.05 | 99.99999 % | 7 |

La *gestión* se refiere al proceso conocido como *screening*, donde se evalúa e investiga meticulosamente un elemento, dispositivo o sistema, con el fin de asegurar su conveniencia en cierta aplicación. Como se puede deducir de la Tabla 3.4, la disponibilidad de un sistema se vuelve crítica cuando se trata de sistemas de alto impacto y riesgo, especialmente aquellos en donde existen vidas o bienes en peligro.

3.3.3. Sostenibilidad (*Maintainability*)

La ISO la define como “*la habilidad de un elemento de conservar o restablecer, bajo ciertas condiciones de uso, un estado en el que pueda desempeñar una función requerida, cuando se realiza un mantenimiento empleando procedimientos y recursos establecidos*” [75].

Por otro lado, una definición más robusta, establecida por la milicia de los Estados Unidos, no considera que la conservación y restablecimiento de la función requerida sea una habilidad, sino una función de diseño, y que además, incluye la facilidad relativa, los recursos y el tiempo necesario para lograr ese objetivo [80].

3.3.4. Seguridad (*Security*)

El concepto de seguridad, como se mencionó en la sección 3.3, está asociado con varios términos aplicables no sólo a la Ingeniería de Confiabilidad.

Desde la perspectiva de la Ingeniería de Confiabilidad, la seguridad puede ser clasificada en tres categorías, relativas a la protección de las siguientes áreas [80]:

- Protección personal
- Protección del equipo
- Protección al ambiente

La pretensión de la clasificación anterior es asegurar, en el mejor de los casos, cualquier riesgo. Del mismo modo, es común encontrar a la terna CIA como elementos necesarios y prácticamente obligatorios en áreas relacionadas a las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC). La Confidencialidad se refiere a las técnicas de control de acceso a información; la Integridad, a la ausencia de alteraciones de la información original.

Finalmente, la seguridad, como término integral puede definirse conceptualmente como “*la existencia simultánea de disponibilidad, confidencialidad e integridad para ciertos usuarios*” [81].

3.4. Amenazas a la Confiabilidad

En algunas ocasiones, dada la complejidad de los sistemas se pueden hacer ciertas consideraciones. Evidentemente en este tipo de afirmaciones es inadmisibles una consideración arbitraria. Las consideraciones más generales y que se tomarán en este trabajo, es la asunción de que las fallas y reparaciones son independientes y condicionales a la falla de cierto componente y a la distribución de reparaciones.

Por otro lado, además de la consideración hecha en la sección 3.2 sobre la omisión de la influencia humana en el análisis, las fallas maliciosas e intencionales, así como las fallas catastróficas, no serán consideradas.

3.4.1. Falla

Una definición básica considera una falla como “*una anomalía física, imperfección o avería que ocurren en un componente de hardware o software*” [82].

Desde el punto de vista más general, una falla es “*la transición de un estado de operación correcto, a otro estado donde existe un mal funcionamiento, que puede ser total o parcial*”. Este estado de mal funcionamiento tiene una evidencia objetiva, llamada *modo de falla*. [83].

De forma simplificada, una falla es el estado de cierto elemento en donde la función requerida no es ejecutada. Pueden ser clasificadas de acuerdo a su modo, causa, efecto o mecanismo [76]:

Modo El modo de la falla se refiere al efecto local, o “síntoma” por el cual se identifica la falla. Algunos ejemplos en elementos mecánicos son la fractura por fatiga, concentradores de esfuerzos, y otros; en componentes electrónicos, los circuitos abiertos, cortocircuitos y degradación. Sobre este último tema se profundizará cuando se trate el análisis de fiabilidad en el Capítulo 4.

Causa Las causas pueden ser *intrínsecas*, cuando la falla se debe a envejecimiento o a debilitamiento del dispositivo, y *extrínsecas*, cuando existe negligencia o error en el diseño o producción. Estas últimas fallas pueden desencadenar fallas sistemáticas, las cuales son determinísticas y deben ser consideradas como *defectos*. Los defectos son aquellas fallas presentes en un tiempo inicial de operación nulo, es decir, cuando $t = 0$. En el presente trabajo sólo se considerarán fallas intrínsecas.

Efecto La consecuencia de la falla puede ser diferente dependiendo del lugar y el tiempo en el que haya ocurrido. Una clasificación usual, partiendo de la discriminación entre fallas primarias y secundarias, es la de fallas no relevantes, fallas parciales, fallas completas, y fallas críticas. En el caso de la clasificación inicial, las fallas primarias son aquellas que desencadenan las fallas secundarias.

Mecanismo Se refiere al proceso mecánico, químico o de otra naturaleza que desencadenó la falla.

Otro concepto relevante es el de las Fallas de Modo Común [*Common-Mode Failure (CMF)*], definida por la Autoridad de Energía Atómica del Reino Unido [*United Kingdom Atomic Energy Authority (UKAEA)*] como “el resultado de un evento en donde, debido a la dependencia de los elementos, provoca un estado de falla coincidente en dos o más canales de un sistema redundante, ocasionando que la operación de la función requerida del sistema falle” [84], es decir, es la avería simultánea de varios elementos, ocasionada por cierta falla individual.

3.4.2. Error

Un error se genera cuando existe una falla en cierto elemento y dicho elemento es accionado; es decir, un error es la consecuencia de una avería. Otra definición considera al error como una desviación a partir de un valor verdadero [82]; esta definición es aplicable a sistemas numéricos o computacionales.

Desde el punto de vista de la Ingeniería de confiabilidad, un error es la *activación* de una falla [83]; sin embargo, puede existir el caso de una falla latente, que a pesar de su existencia, no presente una consecuencia directa en la operación del sistema. Del mismo modo, un error es latente hasta que es observado y/o lleva al sistema a un estado de daño.

3.4.3. Daño

La Figura 3.2 ilustra la cadena $Falla \rightarrow Error \rightarrow Daño$, donde el daño es la consecuencia, el efecto general, de un error en el sistema. El impacto y consecuencias del daño dependen de las condiciones precedentes, es decir, de dónde ocurre la falla y cuándo se genera el error. El daño es, en conclusión, la observación externa de un error en el sistema [83].

Los tres elementos de la cadena están profundamente asociados con la naturaleza de un elemento sujeto a fallas. En el caso de la aparición de una falla en un elemento, éste puede ser un *elemento reparable* o *no reparable*. Las cualidades de estos sistemas serán abordados a profundidad en la subsección 3.6.1, pero de manera general, se puede decir que un *elemento reparable* es un elemento que una vez en el estado de falla, puede regresar a su estado original, es decir, la *reparación* se realiza a nivel local. La Figura 3.3 muestra un diagrama conceptual de este atributo.

La Fiabilidad es generalmente asociada con elementos *no reparables*, mientras que los conceptos de disponibilidad y sostenibilidad, abordados en la subsección 3.3.3 son principalmente asociados a los sistemas *reparables* [80].

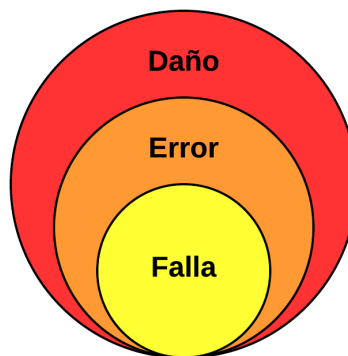


Figura 3.2: Cadena $Falla \rightarrow Error \rightarrow Daño$. Adaptada de [83].

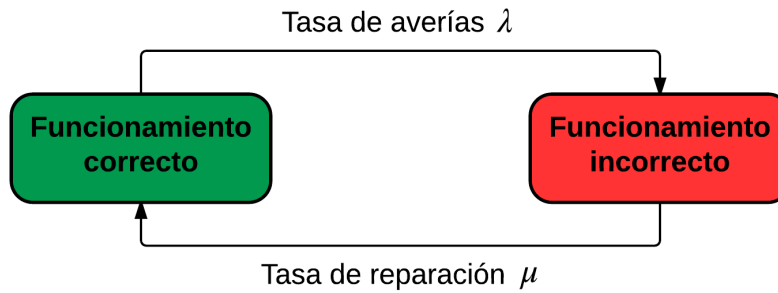


Figura 3.3: Estado general de un sistema reparable. Adaptada de [83].

3.5. Medios de Confiabilidad

Como se mencionó en la sección 3.1, una vez que se acepta que todo sistema podrá presentar fallas, es común generalizar su ocurrencia en dos categorías principales: fallas benignas y fallas catastróficas [83]. Las fallas catastróficas generarán, inevitablemente, errores que eventualmente llevarán a la falla general del sistema.

Las fallas benignas no implican que su aparición sea *deseada* o *esperada*, pero de acuerdo a la construcción de un sistema que pueda ser confiable, es necesario conocer cuáles son los procesos que pueden desencadenar una falla y aplicar alguna técnica que pueda corregir dicho estado.

De forma general, la Prevención y Tolerancia de fallas tienen como objetivo proveer al sistema de los atributos de confiabilidad, mientras que la Remoción y Predicción de fallas pretenden alcanzar un estado de confianza para los atributos de confiabilidad, justificando, entre otras cosas, que la función requerida, junto con las especificaciones de disponibilidad y seguridad, serán cumplidas [81]. En las subsecciones siguientes se abordarán estas técnicas, profundizando en la Tolerancia a fallas.

3.5.1. Remoción de Fallas

En términos globales, la remoción de fallas durante el desarrollo de un sistema contiene las siguientes etapas [73]:

Diagnóstico Una vez que el sistema ha sido diseñado para cumplir cierta función requerida, es verificado para garantizar que su operación se adhiere al propósito inicial. En caso de disyuntiva, se diagnostica el elemento que no satisfizo las condiciones de la función requerida y se realiza su corrección.

Corrección Con el diagnóstico de falla, se realiza una serie de modificaciones con el fin de corregir dicho estado. Los cambios propuestos dependerán de la naturaleza y el diagnóstico realizado.

Verificación Al finalizar la corrección, el proceso de verificación de la función requerida será repetido con el fin de confirmar que la falla ha sido removida. Este proceso tiene dos rutas: la verificación *estática* se realiza sin la ejecución del sistema (inspección detallada); la verificación *dinámica* lo ejecuta.

La remoción de fallas tiene la virtud de que puede ser aplicada tanto en el desarrollo inicial de un sistema, como en la etapa operativa. Cuando se realiza en esta última etapa, de forma metódica y periódica, se nombra *mantenimiento preventivo*; si se realiza una vez que la falla se presentó, se torna *mantenimiento correctivo*.

3.5.2. Predicción de Fallas

En el análisis de fiabilidad de un sistema, es común realizar una primer disección a partir de la falla, es decir, a partir del análisis global sobre *lo que podría presentar un mal funcionamiento*. Existen reglas generales sobre la predicción de la localización y causa de errores [85], las más comunes son las siguientes:

- Análisis de error a partir de la influencia humana
- Análisis de interfaces, es decir, identificar posibles causas de falla en la unión de elementos o subsistemas

Además de las aproximaciones anteriores, la predicción de fallas tiene dos tratamientos: el cualitativo y el cuantitativo [81], [82]. La evaluación cualitativa pretende, entre otras cosas, la identificación, clasificación y jerarquización de modos de falla o combinaciones de eventos (a nivel local y de los alrededores del sistema) que pueden llevar al elemento o sistema al estado anómalo. La evaluación cuantitativa apunta a la evaluación probabilística de atributos de confiabilidad.

En esta última evaluación, dos puntos de vista son aplicables: el tratamiento probabilístico a través del modelado, y a través de la experimentación.

3.5.3. Prevención de Fallas

La prevención de fallas es estimada como un elemento fundamental de todo sistema de Ingeniería [81] y es considerado un peldaño preliminar en las etapas de especificación, ejecución, y fabricación, así como en diversas metodologías de diseño y sistemas de control de calidad; ésto produce la inclusión de múltiples influencias en las medidas de precaución a tomar relativas a la operación del sistema y los posibles escenarios no deseados [73], [82].

Algunas técnicas adicionales incluyen el uso de alarmas y sistemas de supervisión, con el fin de establecer extremos de operación segura y de daño hipotético [83]. En sistemas mecánicos es común la aplicación de inspecciones de rutina; de este modo, en ocasiones es posible identificar etapas preliminares a la fractura en materiales [86].

3.5.4. Tolerancia a Fallas

De manera concreta, la tolerancia a fallas *“es la habilidad de un sistema de continuar en operación en presencia de una falla”* [87]. Esto es, aceptar que todo sistema, a pesar de poseer un sistema robusto y de calidad, puede, eventualmente, presentar fallas, y al mismo tiempo contempla cómo es que el sistema podrá hacer frente a esta situación. A pesar de existir varias técnicas, la base fundamental de los sistemas tolerantes a fallas es la redundancia, concepto sobre el cual se profundizará en la sección 3.7.

Dentro de las técnicas más usuales de Tolerancia a Fallas, se encuentran las siguientes [82], [88]:

Prevención de fallas Se refiere a la mejora de calidad y localización de cierto elemento dentro del sistema.

Enmascaramiento de fallas A través de un dictaminador de mayoría o códigos de detección de errores, las anomalías pueden ser omitidas.

Tolerancia a fallas Trata el hecho de aceptar que un sistema podrá presentar fallas, pero que a través de la técnica adecuada, el sistema será capaz de operar correctamente.

Por lo general, las técnicas generales antes mencionadas se agrupan bajo el mismo concepto de *Tolerancia a fallas*.

La Figura 3.4 muestra una visión general sobre la Tolerancia a Fallas presentada por Algirdas Avižienis [81]. En ella se aborda, de manera mucho más específica, las cualidades y atributos que puede poseer un sistema tolerante a fallas, siendo los dos puntos determinantes la detección de errores y la recuperación desde un estado fallido al estado operacional.

Una característica notable de los sistemas tolerantes a fallas es que pueden ser verificados a partir de lo que se conoce como *inducción de fallas*. Mediante este mecanismo es posible examinar al sistema y comprobar que en presencia de una falla, se mantiene en operación [73].

3.6. Evaluación de Fiabilidad

Dentro de las técnicas y metodologías generales para evaluar sistemas y dar soporte con el espíritu de desarrollar un sistema confiable, existen principalmente las siguientes [83]:

Evaluación probabilística o Evaluación cuantitativa Su propósito es emplear modelos matemáticos con el fin de estimar los Atributos de Confiabilidad explorados en la Sección 3.3. Algunas técnicas comunes son los Modelos de Markov, la Matriz de Transición y Diagramas de Estado.

Evaluación cualitativa Tiene el objetivo de sintetizar y comprender las posibles consecuencias del mal funcionamiento o mal desempeño de un elemento o sistema. El Análisis de Modo de Falla y Efectos (FMEA), Análisis de Modos, Efectos y Criticidad (FMECA), y el Análisis de Árbol de Fallas (FTA) son algunas de las técnicas cualitativas más comunes.

Métodos cuantitativos Existen métodos cuantitativos analíticos (axiomáticos) y experimentales (empíricos), los cuales pueden ser empleados de acuerdo con el nivel de complejidad del sistema a evaluar.

Los métodos experimentales son más costosos y complejos que las técnicas analíticas, además de que la evaluación de confiabilidad es complicada debido a la necesidad de largos periodos de evaluación. Por otra parte, los métodos analíticos pueden complementarse con simulaciones, donde a partir del uso de modelos matemáticos, diversos parámetros pueden ser deducidos.

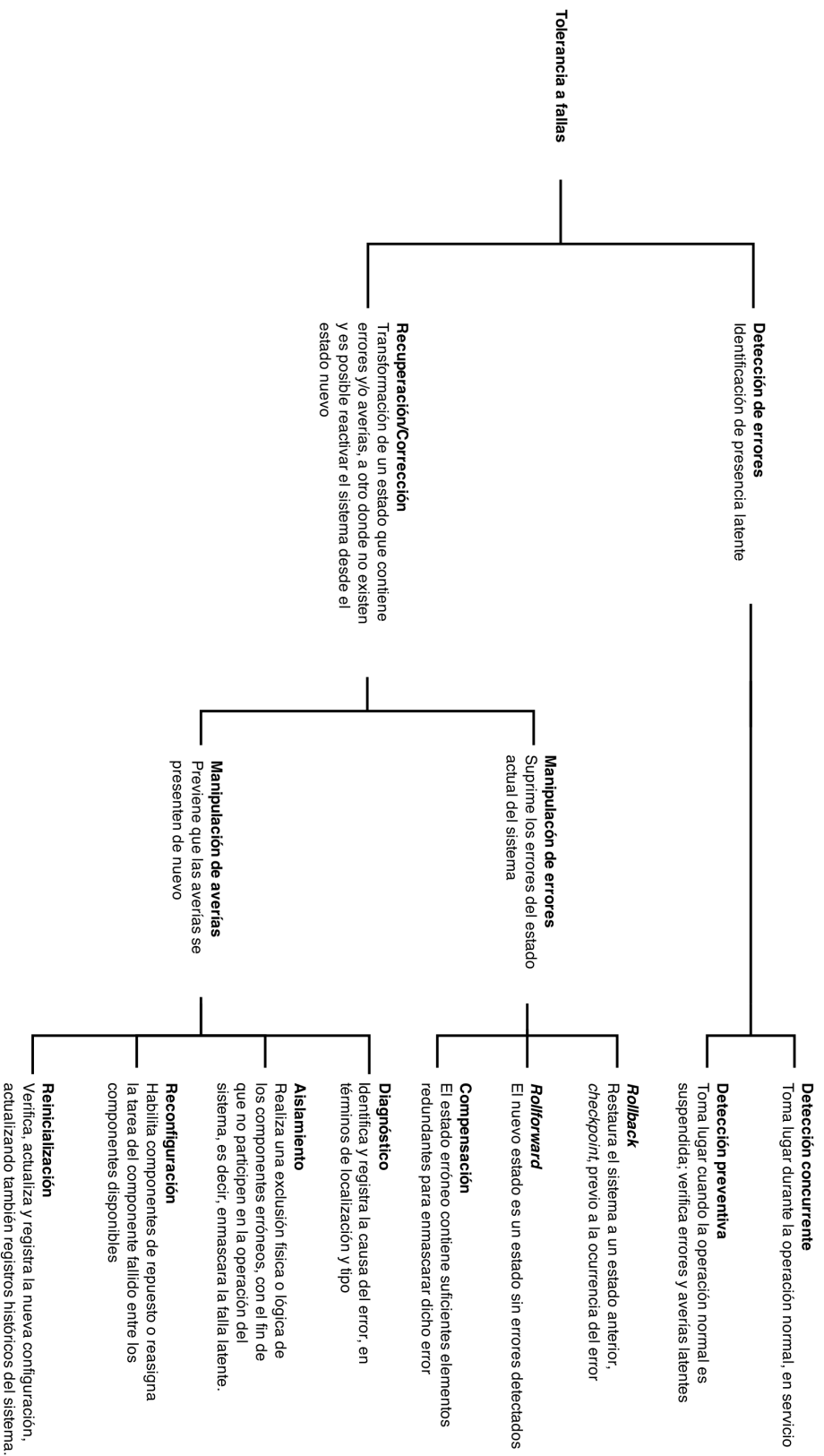


Figura 3.4: Técnicas de Tolerancia a Fallas. Adaptado de [81].

3.6.1. Sistemas reparables y no reparables

Tal como se abordó brevemente en la subsección 3.4.3, dentro del análisis de fiabilidad, existen los elementos (o sistemas) reparables y no reparables. Formalmente, un elemento reparable “es aquel que después fallar en la ejecución de una o más de sus funciones, puede ser restaurado a un estado de total y satisfactorio desempeño, por otro método que no sea el reemplazo total de dicho elemento” [89]; su tiempo de vida útil está definido por T_r , como el total de horas en operación [90]. Por otra parte, un elemento no reparable es aquél que una vez que falla, es descartado; además, su tiempo de vida útil está definido por una variable aleatoria T_{nr} , que asigna un único tiempo antes de que ocurra una falla. Lo anterior tiene como consecuencia que para un grupo de sistemas o elementos iguales, sus tiempos de vida se consideran independientes y estadísticamente idénticos [90].

Dentro de esta concepción de elemento reparable existe la reparación *perfecta* e *imperfecta* [91]. La primera de estas definiciones considera que la acción de reparación es perfecta y que el sistema regresa a su estado original bajo condiciones iniciales, es decir, como si se tratara de un elemento totalmente nuevo. Aunque esta asunción resulta imposible, en la práctica es común afirmar que bajo acciones de reparación de alta calidad, la reparación se *considera* ideal.

De forma complementaria, las reparaciones imperfectas pueden considerarse *mínimas*, cuando la intervención en el elemento anómalo es menor, o *generales*, cuando se trata de un reemplazo total. Las reparaciones mínimas incluyen servicios de reparación local y mantenimiento correctivo, y para considerarse dentro de la categoría general de reparación, todas las metodologías y técnicas de mantenimiento deben ejecutarse en base a estándares establecidos para cada área [80].

3.6.2. Tasa de averías (λ)

Uno de los elementos que permite cuantificar la fiabilidad de un sistema es la tasa de averías, denotada como λ . Se define, de forma general, como la probabilidad condicional de falla de cierto elemento, en cierto intervalo [91]. En una simplificación cuantitativa, λ se define como:

$$\lambda = \frac{\text{Número de averías}}{\text{Tiempo total de operación}} \quad (3.6.2.1)$$

Donde:

$$[\lambda]_u = \frac{\text{averías}}{h} \quad (3.6.2.2)$$

Existen varios modos de determinar la tasa de averías para un dispositivo específico, las más comunes se describen a continuación [92]:

Datos históricos sobre el sistema De acuerdo a datos históricos registrados por el fabricante es posible obtener información acerca de la falla de cierto dispositivo; ésto puede ser usado para calcular la tasa de averías para dichos dispositivos o sistemas. Esta estimación resulta útil no sólo a partir de largos historiales de registro ya que la estimación para dispositivos o sistemas relativamente nuevos o similares puede realizarse a partir de los mismos datos.

Tasa de averías gubernamental o comercial Las organizaciones gubernamentales y/o comerciales suelen tener manuales sobre las tasas de avería de dispositivos, ya que es común que se realicen pruebas de control de calidad en ese tipo de instituciones. Los manuales existentes que detallan la tasa de averías en dispositivos, son generalmente para dispositivos de grado comercial, incluyendo componentes no electrónicos. En el caso de componentes de grado militar, es común encontrar dicha información si es que este dispositivo es fabricado por una empresa que tenga diferentes clases de dispositivos (aeroespacial, militar, automotriz, comercial).

Prueba experimental A pesar de que para ciertos dispositivos, marcas o fabricantes, se puede encontrar la información relativa a la tasa de averías, representa un estimado significativo de cierto lote o producción, por lo que se considera que el modo más preciso de determinar la tasa de averías para un dispositivo particular es la prueba experimental. Esta alternativa es generalmente costosa, por lo que se emplean los datos disponibles de los fabricantes.

Resulta importante destacar el hecho de que la tasa de averías se mantiene constante respecto al tiempo para elementos electrónicos estadísticamente idénticos e independientes. Esta asunción es una consecuencia de la forma de obtención de los datos que dan soporte a la determinación de la tasa de averías. El hecho de que la tasa de averías, como elemento cuantitativo se considere constante no implica, de ningún modo, que el elemento no se esté degradando de forma interna, sin embargo, para el análisis se considera que el elemento opera en una etapa de vida útil. Las tres fases mostradas en la Figura 3.5 se describen a continuación [76], [93]:

1. Mortalidad o falla temprana: La tasa de averías presenta un decaimiento general rápido, donde las fallas son generalmente asociadas a causas aleatorias de fabricación, materiales o fallas intrínsecas; sin embargo, en algunos casos este comportamiento puede no ser relevante. Las unidades de la tasa de averías son típicamente los *elementos defectuosos por cada millón* [*Defective Parts Per Million (DPPM)*].

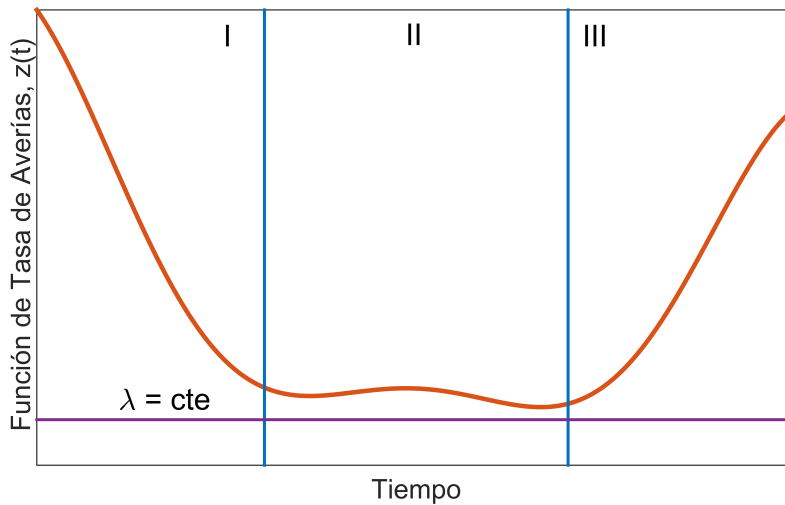


Figura 3.5:
Evolución típica de la Tasa de Averías en *hardware*.
(I) Mortalidad temprana (II) Vida útil (III) Desgaste. Adaptado de [82].

2. Vida útil: En esta etapa la tasa de averías permanece prácticamente constante. Dentro de las distribuciones estadísticas aplicadas en las fallas posibles en la vida útil de un elemento, se encuentra la de Poisson. En esta etapa la tasa de averías es expresada generalmente en unidades de *Fallas en el Tiempo* [*Failure in Time (FIT)*] o *Tiempo Medio Entre Fallas* [*Mean Time Between Failures (MTBF)*].
3. Desgaste: λ sufre un incremento notable, donde las fallas en este periodo son generalmente atribuidas al envejecimiento, fatiga, corrosión y otros.

3.6.3. Tasa de restauración (μ)

Este parámetro, análogo a la tasa de averías, está definido de manera general, como la rapidez con la que un sistema, una vez que falla, vuelve a su estado de disponibilidad. Evidentemente, en sistemas reparables se busca que este parámetro sea alto con el fin de aumentar la disponibilidad general del sistema.

En un sentido más formal, puede definirse como “la razón de cambio respecto al tiempo de la tasa media de fallas” [94]. De una manera más formal, se define a partir de la siguiente función:

$$\mu = \frac{d}{dt}M(t) \quad (3.6.3.1)$$

Donde:

$M(t)$ Número medio o número esperado de fallas acumulativas, como función del tiempo.

3.6.4. Fallas en el Tiempo [*Failure in Time (FIT)*]

Este parámetro es un término asociado a la tasa de averías en dispositivos semiconductores. De manera general, se define como la tasa de averías de cierto elemento por cada 10^9 horas-dispositivo [95]. En la subsección 4.17.2 se abordará este importante parámetro con mayor profundidad.

3.6.5. Tiempo Medio Hasta la Falla [*Mean Time To Failure (MTTF)*]

El Tiempo Medio Hasta la Falla [*Mean Time To Failure (MTTF)*] se define como “la media de la distribución de la vida útil de cierta población de dispositivos bajo ciertas condiciones de operación o el tiempo de vida esperado de un dispositivo independiente” [96]. Esto es, el tiempo desde que el dispositivo se pone en operación, hasta que éste falla.

Una de las aclaraciones que debe hacerse sobre este concepto, con el fin de evitar confusiones entre el MTTF y el Tiempo Medio Entre Fallas [MTBF], desarrollado en la siguiente subsección (3.6.6), es que el uso de MTTF como parámetro es sólo válido en dispositivos no reparables, es decir, aquellos que sólo presentarán una primera y única falla [82], [97].

La relación analítica que existe entre λ y MTTF, cuando λ se considera constante, es la siguiente:

$$MTTF = \frac{1}{\lambda} \quad (3.6.5.1)$$

Donde:

$$[MTTF]_u = [h] \quad (3.6.5.2)$$

La ecuación 3.6.5.1 establece que la equivalencia entre MTTF y el inverso multiplicativo de λ es válida en el punto donde el 63.2% de la población ha fallado [95]; los antecedentes de esta condición se detallan en la teoría de la función de distribución acumulativa F , de la distribución probabilística de Weibull, para un valor de β igual a la unidad, donde se tiene que:

$$F = 1 - \frac{1}{e} \quad (3.6.5.3)$$

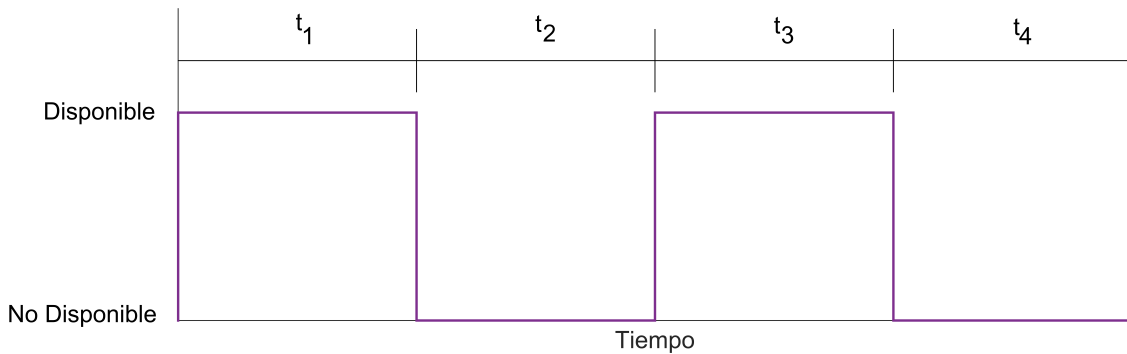


Figura 3.6: Diagrama de operación de elemento reparable. Adaptado de [97].

3.6.6. Tiempo Medio Entre Fallas [Mean Time Between Failures (MTBF)]

El Tiempo Medio Entre Fallas [MTBF] se define como “*el tiempo medio de operación entre fallas de cierto dispositivo, equipo o sistema*” [97]. Es decir, es el tiempo estimado de falla desde que un elemento falló y fue reparado.

Como consecuencia de lo establecido en la subsección 3.6.5 resulta evidente por qué el MTBF es exclusivo de elementos reparables. La Figura 3.6 ilustra de una mejor manera este concepto; en ella se observan tiempos de disponibilidad y tiempos de no disponibilidad.

Al mismo tiempo, al tratar el MTBF se introducen dos nuevos conceptos asociados: el Tiempo Medio Hasta la Reparación [*Mean Time To Repair (MTTR)*] y el Tiempo Medio de No Disponibilidad [*Mean Down Time (MDT)*]. El MTTR es el tiempo medio que toma reparar al elemento una vez que ha fallado; el MDT es el tiempo medio que el elemento no está disponible durante la vida de operación (t_2, t_4 en la Figura 3.6) [97].

Puede notarse que el MTTR y el MDT pueden llegar a ser iguales, es decir, que el tiempo que toma reparar al elemento sea el tiempo que se encuentra no disponible. Este caso particular no siempre se cumple, ya que las siguientes consideraciones deben tomarse en cuenta [97]:

- La falla puede ser no detectada en el momento mismo de la ocurrencia, por lo que puede existir un periodo de no disponibilidad en el que no se está reparando al elemento
- En el caso de ocurrencia de falla, la reparación puede retrasarse por un tiempo indeterminado
- El hecho de que un equipo sea reparado no implica que se ponga en operación de inmediato

Retomando los conceptos abordados en la subsección 3.3.2, así como la Ecuación 3.3.2.1, se tiene entonces, para un elemento reparable:

$$A(t) = \frac{\textit{Tiempo de servicio}}{\textit{Tiempo total de operación}} \quad (3.6.6.1)$$

$$A(t) = \frac{\textit{Tiempo de servicio}}{\textit{Tiempo de servicio} + \textit{Tiempo de reparación}} \quad (3.6.6.2)$$

Donde:

$$\textit{Tiempo de servicio} = \textit{Mean Up time (MUT)}$$

Entonces:

$$A(t) = \frac{MUT}{MUT + MDT} \quad (3.6.6.3)$$

De la Ecuación 3.6.6.3 se concluye que para un sistema reparable, el tiempo de servicio es el MTBF; por otro lado, para un sistema no reparable, el tiempo de servicio corresponde al MTTF. La Tabla 3.5 muestra las aseveraciones anteriores.

Tabla 3.5: Disponibilidad para elementos reparables y no reparables

| Elemento reparable | Elemento no reparable |
|----------------------------------|----------------------------------|
| $A(t) = \frac{MTBF}{MTBF + MDT}$ | $A(t) = \frac{MTTF}{MTTF + MDT}$ |

Es importante mencionar que para un elemento reparable y no reparable existe el MDT. Esta afirmación toma un sentido evidente en el caso de un elemento reparable, sin embargo, para el caso del elemento no reparable, no lo es. Se afirma que un elemento tiene un MDT cuando éste falla antes de su tiempo de vida T_{nr} esperado; de este modo, el tiempo estimado de operación contendrá dos periodos mutuamente excluyentes: el de operación, y aquél en el que el elemento se vuelve indisponible.

Por otro lado, en ocasiones es útil la cuantificación de la no disponibilidad, denotada como $U(t)$, definida por:

$$A(t) + U(t) = 1 \quad (3.6.6.4)$$

$$U(t) = 1 - A(t) \quad (3.6.6.5)$$

Donde, a partir de la Tasa de averías y la Tasa de reparación, se concluye:

$$A = \frac{\mu}{\mu + \lambda} \quad (3.6.6.6)$$

$$U = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \quad (3.6.6.7)$$

3.6.7. Fiabilidad

En la subsección 3.3.1 se definió la fiabilidad de un sistema o componente de forma cualitativa como atributo de confiabilidad; en esta subsección se le tratará de forma cuantitativa. A partir de la Figura 3.5, descrita previamente en la sección 3.6.2, durante la vida útil de un componente electrónico la Función de Tasa de Averías, denotada como $z(t)$, se considera constante.

Como consecuencia de este hecho, la fiabilidad $R(t)$ de un sistema o componente decrece exponencialmente con el tiempo. La fiabilidad, definida como Ley Exponencial de Falla está definida, entonces, por la siguiente expresión:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (3.6.7.1)$$

Donde:

$R(t)$ Fiabilidad en el tiempo t

λ Tasa de averías

t Duración de la misión

La consecuencia más relevante de considerar una tasa de averías constante es que se sobrevalora la posibilidad de falla en etapas tempranas de operación y se desestima en su vida última [98]. La Figura 3.7 muestra la gráfica de la Ecuación 3.6.7.1 para ciertos valores de λ .

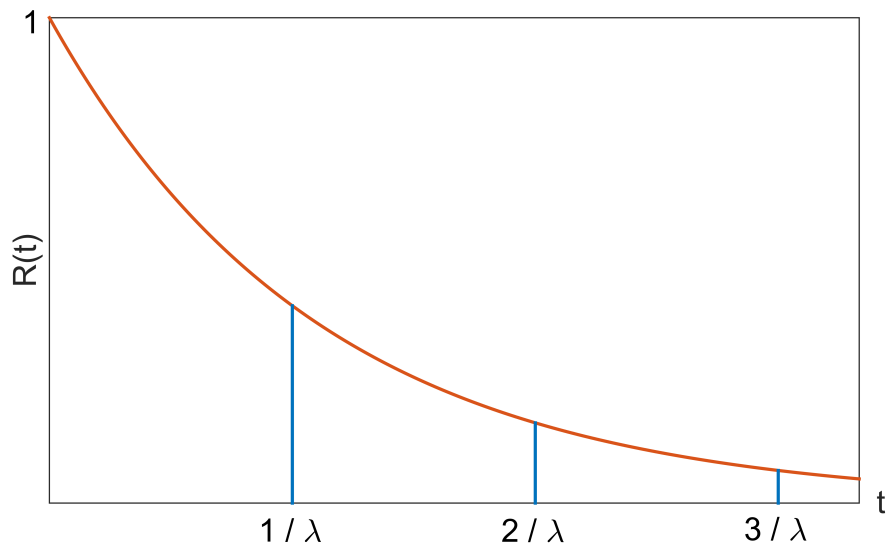


Figura 3.7: Fiabilidad $R(t)$ como función de la Tasa de Averías λ . Adaptado de [82].

3.6.8. Consideraciones adicionales

De acuerdo a consideraciones prácticas y de experiencia en campo, Alessandro Birolini propone una serie de alternativas concretas para el aumento de fiabilidad de un sistema [76]:

- Reducción de esfuerzos eléctricos, mecánicos y térmicos
- Verificación de interfaces en componentes y materiales
- Simplificación de diseño y construcción
- Uso de materiales y componentes de calidad
- Protección contra Descargas Electrostáticas [*Electrostatic Discharge (ESD)*] y validación de Compatibilidad Electromagnética [*Electromagnetic Compatibility (EMC)*]
- Evaluación detallada de componentes y ensambles críticos
- Uso de redundancia

Como comentarios finales, vale la pena concluir esta sección con las siguientes consideraciones [97]:

1. Un elemento que continúa la ejecución de la función requerida por un tiempo relativamente largo (bajo consideraciones de operación y tiempo previsto), es de alta fiabilidad.
2. Un elemento reparable es de alta disponibilidad si su MDT es cercano a su MTTR, y al mismo tiempo, son menores respecto a su MUT.
3. Para un sistema reparable, el MTBF es una medida de fiabilidad, no de expectativa de vida, vida útil o vida promedio.

3.7. Redundancia

Las tareas de mantenimiento e inspección pueden resultar caras para una organización; por otro lado, en el caso de sistemas de difícil acceso, como los remotos, aislados o espaciales, estas tareas no son admisibles. De forma ideal, se desea que un sistema no falle una vez que fue instalado y que al mismo tiempo, durante su vida útil, no necesite mantenimiento. Evidentemente lo anterior es imposible, y si se considera el hecho de que no existe garantía de que cierto sistema sea libre de fallas, y que la búsqueda del elemento *ideal* incluye costos de materiales y fabricación altos, la aplicación de técnicas de Ingeniería de Confiabilidad es una buena alternativa y que tiene como resultado la generación de un producto con alta fiabilidad.

De forma general, mientras más baja sea la fiabilidad de un sistema, mayor será el costo por intervenciones de mantenimiento; sin embargo, el costo de capital aumenta al aumentar la fiabilidad debido a costos asociados a hardware redundante, tiempo invertido, pago a personal y otros [98]. El costo óptimo es aquel que incluye el balance entre la fiabilidad alcanzada y el costo total de la inversión.

La redundancia se define como “*la existencia de más de un medio, para cierto elemento, en cierta función requerida*” [76]. Este concepto, fundamental en la Ingeniería de Confiabilidad, no se limita únicamente al *hardware*, ya que puede ser aplicada en *software*, así como sistemas de Información y Tiempo [99]. En las subsecciones siguientes se abordarán estas áreas a partir de sus elementos generales, concentrando la atención en la redundancia en *hardware*.

La redundancia permite que una falla sea enmascarada o detectada, con el propósito de que una vez localizada, sea contenida y recuperada. Un hecho fundamental es que la redundancia es necesaria, pero no suficiente para lograr un sistema tolerante a fallas integral. Es necesario, además, prevenir la falla y en caso de que exista, corregirla [82].

En el control de sistemas dinámicos tolerantes a fallas, se busca, además de que el sistema siga operando, que existan mecanismos de control tolerantes a fallas, además de aislamiento y detección de fallas. Esto es aplicable no sólo a componentes discretos, sino al sistema completo, considerando actuadores, sensores y plantas a controlar [100].

3.7.1. Redundancia en Software

Esta técnica aborda el empleo de líneas adicionales de código, desde pequeñas funciones o subrutinas, hasta programas completos, con el fin de verificar que los resultados generados por cierto *software* sea correcto.

3.7.2. Redundancia en Información

Este tipo de redundancia implica la adición de información redundante al mensaje original. Esta información adicional codificada en el mensaje original permite no sólo detectar errores, sino corregirlos. Algunos ejemplos de esta técnica son el uso de Códigos de Detección y Corrección de Errores así como sistemas con Verificación Redundante Cíclica [*Cyclic Redundancy Check (CRC)*].

3.7.3. Redundancia en Tiempo

La técnica que se aplica en este caso es la de permitir la repetición de tareas o cálculos y eventualmente, comparar los resultados generados. Su uso general es en sistemas donde sea requerido un menor uso de *hardware*, a costa de un mayor tiempo de procesamiento. Esta técnica es capaz de detectar averías transitorias o intermitentes, así como enmascarar errores y recuperar el estado original del sistema.

3.8. Redundancia en Hardware

De modo integral, la redundancia en *hardware* toma como principio la multiplicidad de elementos de un sistema o partes de ellos. De esta manera se genera un sistema de respaldo que, en caso de falla, ignorará al elemento anómalo y permitirá la ejecución de su función requerida.

En el caso de ciertos procesos industriales la redundancia de actuadores presenta un aumento excesivo en relación a los costos, por lo que se prefiere aplicar esta técnica en sensores. Ésto, además de ser económicamente más viable, le da prioridad a la minimización de la pérdida de productividad y/o a la operación segura de personas y equipos; en contraste a este caso, donde la redundancia es una técnica aplicada al aumento de seguridad y desempeño, en ocasiones es un requerimiento gubernamental o legal, especialmente en sectores donde la seguridad de personas es una prioridad, como plantas nucleares y aeronaves [100].

Uno de los inconvenientes de esta técnica es, sin duda, el aumento del costo asociado a la fiabilidad del sistema [101], sin embargo, el equilibrio entre el costo adicional y la mejora de fiabilidad no es trivial, y debe ser debidamente justificado.

Infortunadamente, éste no es su única desventaja; incremento en masa, volumen, consumo de energía, tiempo de diseño, fabricación y prueba, son algunos de los factores nocivos adscritos a la redundancia en *hardware*.

A pesar de lo anterior, la redundancia en *hardware* es extremadamente valiosa en situaciones donde no es posible o resulta económicamente inviable realizar labores de mantenimiento y supervisión, así como en misiones donde la continua operación del sistema es crítica. Por lo anterior, la aplicación de esta técnica en el CBEI-iiDEA[®] tiene especial relevancia, ya que su propósito fundamental es la eventual operación continua en campo.

3.8.1. Evaluación de fiabilidad en sistemas redundantes

En la sección 3.6 se hizo la discusión de diferentes parámetros analíticos empleados en la evaluación de fiabilidad de sistemas. En esta subsección se tratará, de manera elemental, el cálculo de fiabilidad en sistemas redundantes en serie, paralelo y subsistemas mixtos, con el fin de presentar las bases para el análisis de Diagramas de Bloques de Fiabilidad [*Reliability Block Diagram (RBD)*] del sistema propuesto en la subsección 4.16.

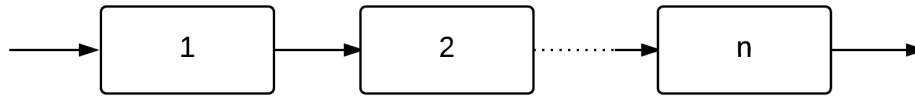


Figura 3.8: Elementos en serie

Elementos en serie

Un sistema en serie es aquél que de acuerdo a su configuración, en caso de avería en uno de sus eslabones, todo el sistema colapsa. Dicho de otra forma, los elementos que conforman el sistema están en serie si todos ellos son necesarios para que el conjunto sea operacional [82]. La Figura 3.8 ilustra un ejemplo de n elementos en serie.

El modelo que define la fiabilidad de este sistema está dado por:

$$R_{serie}(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) \quad (3.8.1.1)$$

Donde $R_i(t)$ es la fiabilidad de cada componente, para $i \in \{1, 2, \dots, n\}$. Si se considera el mismo tiempo t para la misión, se tiene entonces:

$$e^{-\lambda t} = e^{-\lambda_1 t} \cdot e^{-\lambda_2 t} \cdot \dots \cdot e^{-\lambda_n t} \quad (3.8.1.2)$$

$$\lambda_{serie} = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n \quad (3.8.1.3)$$

A partir de las ecuaciones anteriores, se pueden deducir las siguientes propiedades para los sistemas en serie [102]:

1. A mayor número de elementos en serie, menor será la fiabilidad general del sistema.
2. El elemento más debil, aquél con la fiabilidad más baja dentro del sistema, será determinante en la fiabilidad general del sistema.

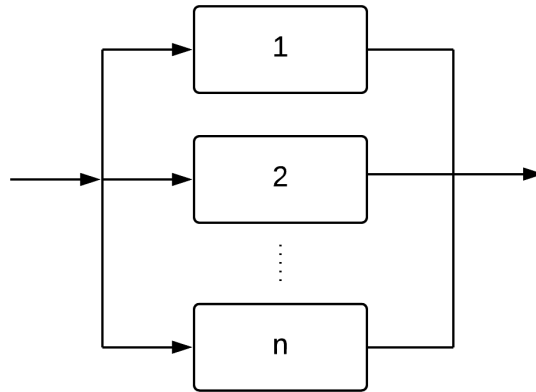


Figura 3.9: Elementos en paralelo

Elementos en paralelo

En esta configuración, por lo menos uno de los elementos es necesario para mantener al sistema operando. Es decir, el sistema sólo colapsará cuando la totalidad de sus elementos falle [103]. La Figura 3.9 muestra una descripción gráfica de un sistema en paralelo con n elementos.

El modelo de fiabilidad para este arreglo se define a continuación:

$$R_{paralelo} = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - R_i(t)] \quad (3.8.1.4)$$

Bajo la consideración de elementos idénticos, en una misma misión t , donde se cumpla:

$$\lambda_n = \lambda_1 = \lambda_2 = \dots = \lambda_n \quad (3.8.1.5)$$

Se concluye:

$$R_{paralelo}(t) = 1 - (1 - e^{-\lambda t})^n \quad (3.8.1.6)$$

Configuraciones combinadas

En caso de que se tenga un sistema con elementos en serie y en paralelo, éste puede dividirse en subsistemas. Una vez hecho lo anterior, es posible simplificar cada subsistema, y eventualmente, ser reducido a su mínima expresión. La Figura 3.10 ilustra lo anterior.

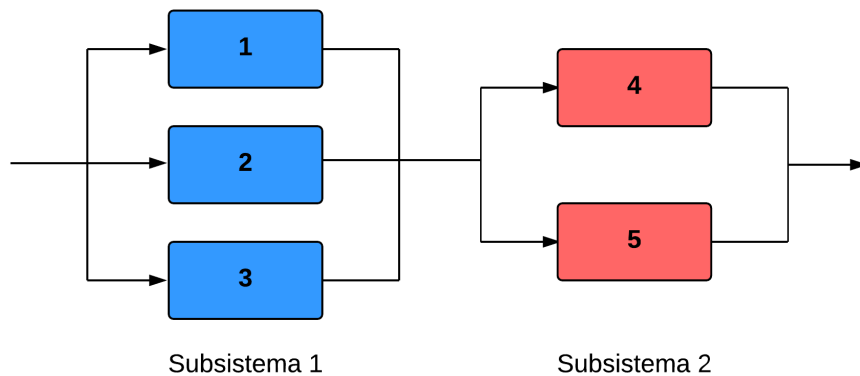


Figura 3.10: Configuración de elementos combinados. Adaptado de [103].

Un punto importante a resaltar en los sistemas redundantes en *hardware* es que, a medida que se agreguen más componentes, en cualquier configuración y bajo cualquier topología, mayor será la complejidad y los imprevistos que pueden fallar, y por lo tanto, la posibilidad de disminución de la fiabilidad [102].

3.8.2. Redundancia pasiva

Este tipo de redundancia, también llamada redundancia *estática*, realiza un *enmascaramiento* u ocultamiento de los efectos de la falla sobre el sistema, sin la intervención del sistema u operador [82]. Un elemento determinante es que la falla no es eliminada o removida, sino que es omitida [99].

Asímismo, se hace la consideración de que no pueden existir fallas simultáneas, pero de acuerdo a la configuración empleada, es posible enmascarar más de una falla [77].

Redundancia modular

Una de las configuraciones básicas de la redundancia pasiva es la Redundancia modular - n . Esta configuración trata la existencia de n módulos independientes que realizan la misma tarea; sus resultados son entregados a un módulo denominado *dictaminador de mayoría*; en éste nueva etapa se ponderan los resultados de cada módulo, y el el valor final que entrega el dictaminador de mayoría es el valor común comunitario [82]. El concepto general se ilustra en la Figura 3.11

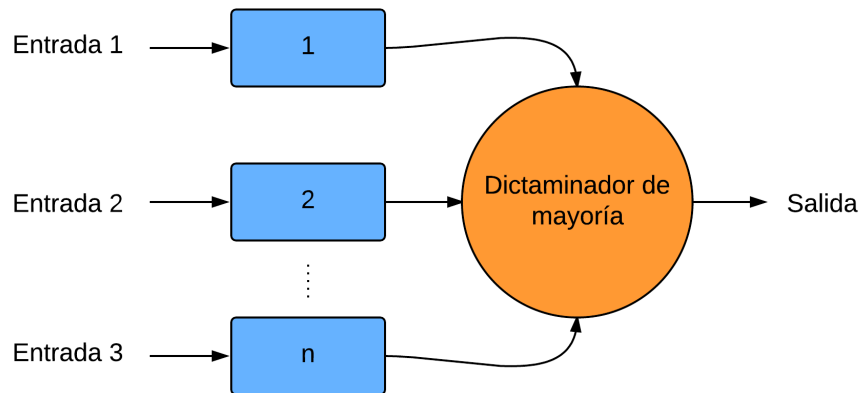


Figura 3.11: Redundancia modular n . Adaptado de [82].

Dentro de las ventajas de este sistema se encuentra el hecho de que su diseño es relativamente simple, sin embargo, para que su aplicación sea válida, la fiabilidad del dictaminador de mayoría deberá ser mayor que la de los módulos independientes. A pesar de que la consideración de la existencia de un dictaminador de mayoría *perfecto*, es incorrecta, es común considerar y llamar de este modo, a todo dispositivo que presente una fiabilidad mayor que el elemento redundante.

3.8.3. Redundancia activa

También llamada redundancia *dinámica*, *paralela* o *caliente*, se define como aquella técnica en donde el sistema se encuentra en operación, con elementos redundantes bajo la misma carga, y al mismo tiempo, realiza rutinas de detección y corrección de errores, mediante el reemplazo de unidades anómalas y reconfiguraciones de elementos [83], [99].

Para que la reconfiguración y deshabilitación de componentes sea posible, el sistema requiere que la falla sea previamente identificada y localizada; una vez satisfecha esta condición, será capaz de tomar las medidas necesarias [82]. De manera general, estas medidas involucran la localización, contención y recuperación.

Dentro de los tipos de redundancia activa, también existe el concepto de redundancia *tibia*. En este arreglo la carga de los elementos redundantes no es la misma; existe un módulo principal, y de forma simultánea, la carga se distribuye entre los elementos adicionales, para que en caso de falla, uno de éstos tome la carga completa.

Redundancia en espera (standby)

En este tipo particular de redundancia activa, también conocida como redundancia *fría*, sólo uno de los elementos redundantes está bajo carga. Los elementos restantes no son sujetos a carga hasta que la operación del módulo principal presenta una falla. Esta acción se realiza a través del *conmutador* (también llamado *selector*), el cual, inhabilita el módulo anómalo y selecciona uno de los módulos adicionales.

La mayor ventaja de esta técnica es que no enmascara al módulo fallido, sino que lo identifica e inhabilita, continuando con la restauración de su función mediante la habilitación el elemento adicional. Sin embargo, el hecho de que el sistema redundante realice acciones mediante el *conmutador* implica tiempo en que el sistema estará indisponible.

A pesar de lo anterior, es común encontrar aplicaciones de redundancia en espera en sistemas que puedan tolerar errores temporales y que además, estén condicionados a ciertas restricciones de consumo energético. Esto se debe a que, a diferencia de las técnicas de redundancia *caliente* o *tibia*, donde los módulos adicionales están activos, en la redundancia *fría* no existe actividad latente en ellos hasta que su presencia sea requerida.

A partir de lo anterior, la fiabilidad de un sistema con redundancia en espera (*standby*), con conmutación *perfecta* de $m + 1$ elementos, que colapsará cuando falle un número m de elementos redundantes, está dada por [104]:

$$R_{std} = \sum_{i=0}^m \frac{(\lambda t)^i e^{-\lambda t}}{i!} \quad (3.8.3.1)$$

Donde:

$R_{std}(t)$ Fiabilidad del sistema en espera (*standby*) en el tiempo t

m Número total de unidades redundantes

λ Tasa de averías

La Figura 3.12 ilustra el principio de operación de la redundancia en espera.

Finalmente, en algunos sistemas la conmutación puede ser manual; es considerada una práctica poco común, pero en caso de que así fuere, es posible cuantificar la fiabilidad del operador mediante las técnicas de fiabilidad humana tratadas en la subsección 3.2 [102].

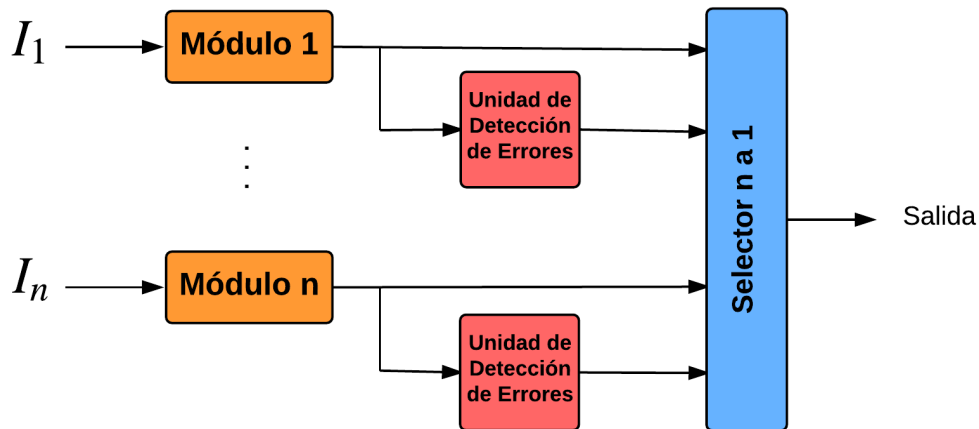


Figura 3.12: Redundancia en espera (*standby*). Adaptada de [82]

3.8.4. Redundancia híbrida

En esta clase se pretende adoptar las técnicas de redundancia activa y pasiva, con el fin de complementar las ventajas de cada una [99]. Existen dos técnicas principales, la redundancia de *auto purga* y la redundancia modular n con módulos adicionales. La pretensión general de estas técnicas es el *enmascaramiento* inicial de fallas, con la identificación, localización y recuperación en segundo plano. El primer enmascaramiento tiene el objetivo de prevenir la generación de resultados anómalos parciales, anulando tiempos de inhabilitación, a diferencia del principio de la redundancia *fría* [82].

3.9. Conclusiones

Los conceptos fundamentales tratados en este capítulo, forman parte de un acercamiento integral a las técnicas del Análisis de Riesgo y la Ingeniería de Confiabilidad. Hasta el momento, los capítulos abordados conforman un marco de referencia robusto, en el cual, con las bases fundamentales de la Geotermia, el principio de operación del CBEI-iiDEA[®] y las técnicas de tolerancia a fallas mediante la redundancia en *hardware*, es posible la propuesta de un sistema de instrumentación tolerante a fallas.

En el capítulo siguiente se retomarán los conceptos, herramientas y modelos de la Ingeniería de Confiabilidad en el análisis cuantitativo y cualitativo del sistema de instrumentación propuesto.

Página intencionalmente en blanco

Capítulo 4

Instrumentación electrónica tolerante a fallas para Ciclo Binario de Evaporación Instantánea CBEI-iiDEA®

4.1. Introducción

El sistema integral que se propone para la instrumentación del CBEI-iiDEA® considera múltiples elementos correspondientes a diferentes áreas de ingeniería, los cuales pretenden que el sistema pueda ser supervisado de forma local y remota.

El presente trabajo contiene las bases del futuro sistema integral, limitándose a la instrumentación general y la aplicación de técnicas de tolerancia a fallas mediante la redundancia de *hardware*. El sistema completo, así como las áreas que se abordan se muestran en la Figura 4.1.

En este capítulo se revisarán, de manera general, los componentes del sistema de instrumentación, con el fin de establecer el contexto del trabajo actual y el objetivo futuro de que, eventualmente, puedan ser incorporadas diversas áreas adicionales, específicamente las de Telemetría y Control Remoto.

Una vez que se tiene el contexto del plan integral de Instrumentación, Telemetría y Control, se hace una discusión detallada de la Instrumentación tolerante a fallas a partir de los requerimientos del CBEI-iiDEA®, incluyendo criterios de selección, diseño y análisis de fiabilidad del sistema generado.

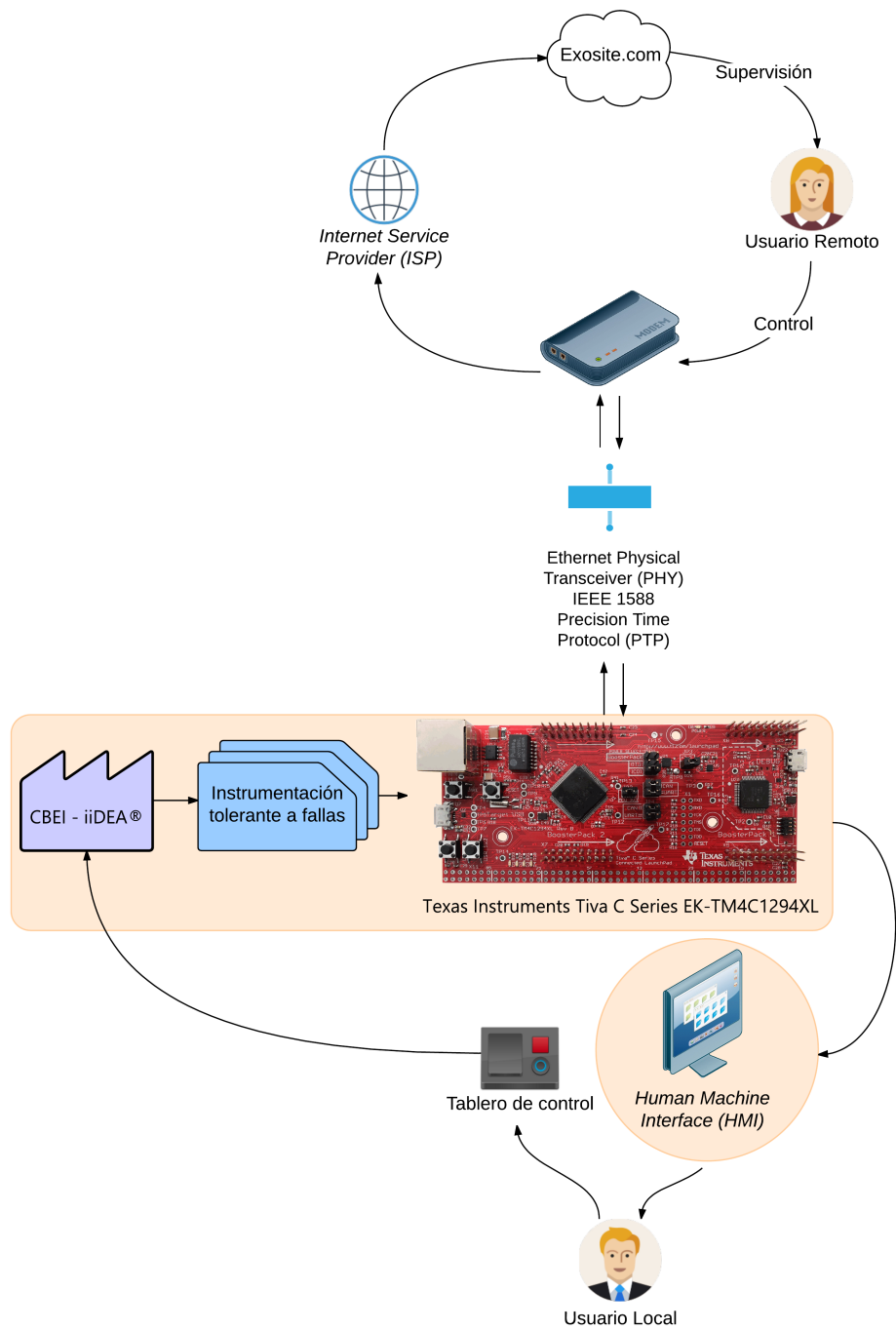


Figura 4.1: Sistema integral de Instrumentación, Control Remoto y Telemetría del CBEI-iiDEA®

4.1.1. Sistema integral de Instrumentación, Control Remoto y Telemetría

El *Internet of Things (IoT)* es un término que en los últimos años ha tomado especial relevancia en los sistemas embebidos de vanguardia. A pesar de lo anterior, el término fue usado por primera vez en 1999, por el *Auto-ID Center*, del Instituto Tecnológico de Massachusetts [*Massachusetts Institute of Technology (MIT)*] [105].

En términos generales puede definirse como una arquitectura de dispositivos cuyo propósito es el intercambio de información. La peculiaridad de esta arquitectura es que su uso está orientado a productos y servicios en una cadena comercial, con increíble potencial en aplicaciones de infraestructura y supervisión industrial, ingeniería de transporte, logística, localización, seguridad, salud, hogar, y entretenimiento [106].

Uno de los elementos que por ahora hacen que el IoT todavía no se desarrolle de manera masiva, son los inconvenientes que algunos autores han señalado respecto a la seguridad y el manejo de la información sensible que algunos dispositivos pueden contener, confidencialidad de datos y técnicas de cifrado [107], [108].

Algunas de las compañías que actualmente desarrollan soluciones de seguridad para este tipo de dispositivos son encuentran McAfee® , Intel® y Eurotech® , que además de visualizar al IoT como oportunidad de desarrollo, el aseguramiento y contención de amenazas garantiza que estos dispositivos sean un nuevo mercado potencial.

El nuevo sector económico emergente podrá ser determinante en los próximos años, con la diversificación de productos de consumo conectados a la *nube* y dirigidos principalmente a usuarios finales.

Una de las particularidades de la tarjeta de desarrollo seleccionada, y que se abordará en la subsección 4.11, es que de forma nativa tiene conectividad a internet a través del protocolo Ethernet, con una dirección de control de acceso [*Media Access Control (MAC)*] predeterminada. Este hecho permitirá la coexistencia de dos tipos de usuarios: Local y Remoto.

El usuario remoto tendrá poder sobre la supervisión y control en cualquiera de las dos vías propuestas. La primera, mediante el acceso local a la tarjeta; la segunda, mediante el acceso al sitio Exosite® (<http://exosite.com>), orientado al desarrollo de productos basados en el *Internet de las Cosas*. Esta característica prevista será uno de los puntos a desarrollar como parte de los trabajos posteriores al sistema de instrumentación.

4.2. Análisis de Modo y Efecto de Falla [*Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)*]

Como se abordó en la sección 3.6, el FMEA es un procedimiento y metodología empleada en el análisis y cuantificación de la fiabilidad de un sistema. Una de sus principales virtudes es que involucra un análisis sistemático de fallas potenciales bajo ciertas condiciones y consideraciones, así como sus efectos, con el objetivo fundamental de no sólo identificar las áreas de fiabilidad críticas, sino de influenciar la toma de decisiones en las medidas a tomar para reducir la probabilidad de falla, aumentando su fiabilidad [109], [110].

Al tratarse de un método inductivo de análisis de sistemas (también conocido como *bottom-up*), se parte de consideraciones específicas hacia una conclusión general. En este sistema se propone cierta falla, y a partir de ella, se hace el análisis sobre las consecuencias que ésta tiene sobre la posible falla general del sistema [77]. Evidentemente, los sistemas a analizar pueden ser de diferente naturaleza y principio, por lo que no existe una única ruta o parámetros de evaluación.

Los orígenes del FMEA se remontan a la segunda mitad temprana del Siglo XX, a partir del desarrollo de técnicas de análisis de fallas en el Departamento de Aeronáutica de la Armada de los Estados Unidos [111], posteriormente la técnica se refinó y orientó hacia el análisis de efecto de fallas; eventualmente, la Administración Nacional de Aeronáutica y Espacio [*National Aeronautics and Space Administration (NASA)*] extendió las funciones del FMEA, renombrando la técnica a FMECA [112]. A pesar de que la aeronáutica fue determinante en el desarrollo del FMEA, dado su enorme potencial, la técnica ha sido empleada en los últimos años en la industria aeroespacial, médica, y de generación de potencia [113].

4.2.1. Clasificación

Ireson propone, a partir del nivel de aplicación de FMEA, la siguiente clasificación [114]:

FMEA a nivel de sistema Esta categoría es la más alta, relativa al nivel de análisis, ya que es aplicada en la jerarquía de sistemas, y tiene como propósito la identificación de fallas en sistemas, subsistemas y las relaciones entre interfaces e interacciones

FMEA a nivel de proceso Identifica y previene fallas relativas a la producción, ensamble, construcción o instalación de equipos. Incluye la identificación de modos potenciales de falla a nivel de equipo.

FMEA a nivel de diseño Trata la identificación de modos potenciales de falla, definición y tratamiento de requerimientos, establecimiento de alternativas de diseño en etapas tempranas y especificaciones en el diseño de detalle. Dado que trata las generalidades de diseño, puede ser aplicada a nivel de sistema, subsistema o componentes. Esta clase de FMEA será la metodología empleada en el sistema de instrumentación tolerante a fallas.

4.2.2. Metodología

La selección de los procedimientos específicos en el FMEA depende del objetivo e intención de su aplicación e información disponible; considerando las observaciones de diferentes autores ([76], [80], [102], [113]) se propone la siguiente metodología general:

1. Establecimiento de función requerida
2. Listado o selección de elementos. En caso de ser necesario, definir desempeño o características requeridas
3. Definición de sistema a analizar, límites y restricciones
4. Identificación y descripción de cada elemento, así como sus posibles modos de falla y efectos asociados
5. Determinación de asunciones y consideraciones a aplicar en el análisis y definición de modos de falla
6. Diseño de diagrama esquemático
7. Construcción de RBD
8. Determinación de tasa de averías para cada componente
9. Realizar el cálculo de fiabilidad para el sistema
10. Verificar que la fiabilidad satisfaga requerimientos de operación.
11. En caso de que los objetivos de fiabilidad no sean satisfechos, determinar las previsiones a tomar para cambios de diseño
12. Finalmente, documentación de los resultados en *hojas de trabajo* de FMEA

La reducción simplificada de la metodología a adoptar se presenta en la Figura 4.2, con el fin de ilustrar que a pesar de que el FMEA tiene fines analíticos, también puede emplearse como herramienta en el proceso iterativo de diseño.

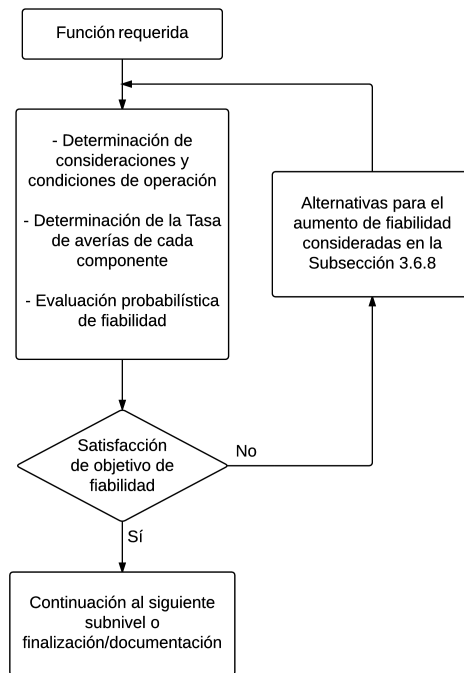


Figura 4.2: Diagrama simplificado de metodología de diseño. Adaptado de [76].

4.2.3. Información contenida

Existen diferentes parámetros a considerar en la documentación del FMEA, los cuales son generalmente condensados en *hojas de trabajo*, con estructura y formato tabular, con el propósito de ser herramienta y medio de comunicación en el tratamiento sistemático del análisis. A partir de las consideraciones hechas por diversos autores ([102], [109], [115]) se propone el uso de los siguientes parámetros:

1. Etiqueta/descripción: Código de identificación y descripción de componente
2. Función: Descripción de la función requerida
3. Modo de falla: En caso de múltiples modos de falla, considerarlos de modo independiente
4. Causas de falla: Posibles causas de avería
5. Método de detección de fallas: Elementos clave de diseño por los cuales la falla puede ser identificada y localizada
6. Efecto: Consecuencias a nivel local de la falla
7. Tasa de averías

4.3. Función requerida

Retomando la definición de *función requerida* dada en la sección 3.3.1, dentro del análisis y diseño de sistemas tolerantes a fallas es imperativa la necesidad de establecer una Función Requerida. De manera detallada, especifica la tarea del elemento o sistema; es el punto de partida para cualquier análisis, ya que define las posibilidades de averías [76].

En la definición de la función requerida suelen establecerse, entre otras cosas, las condiciones de operación (humedad, temperatura, medios corrosivos, vibraciones, ruido, etc.); éstas condiciones específicas son determinantes en la consideración del espacio final donde el sistema desempeñará su misión. En una primera estimación, es también posible indicar dichas condiciones con un margen de tolerancia o incertidumbre.

En términos generales, la definición incluye los límites del sistema, desempeño requerido y modos de operación.

4.3.1. Definición

Para el caso del sistema de instrumentación del CBEI-iiDEA[®], se propone la siguiente función requerida:

Registro de temperatura y presión en puntos críticos del CBEI-iiDEA[®] (establecidos en la subsección 2.6), con el fin de ofrecer condiciones de registro y supervisión que permitan la evaluación de los siguientes puntos:

- Evaluación de acercamiento (*pinch point*) de intercambiador de calor
- Caracterización de caída de presión en válvula de compuerta y/o placa orificio
- Evaluación de condiciones operacionales de separador ciclónico

Bajo las siguientes condiciones de operación y tiempo de misión:

- Operación continua de 10 años (87660 horas)
- Temperatura de operación en el intervalo [2,30] [°C], ± 10 [°C]
- Humedad relativa en el intervalo [18,94] [%], ± 5 [%]

Las condiciones de operación para temperatura y humedad relativa están basadas en las condiciones extremas de registros históricos de la Ciudad de México entre 1990 y 2012 [116].

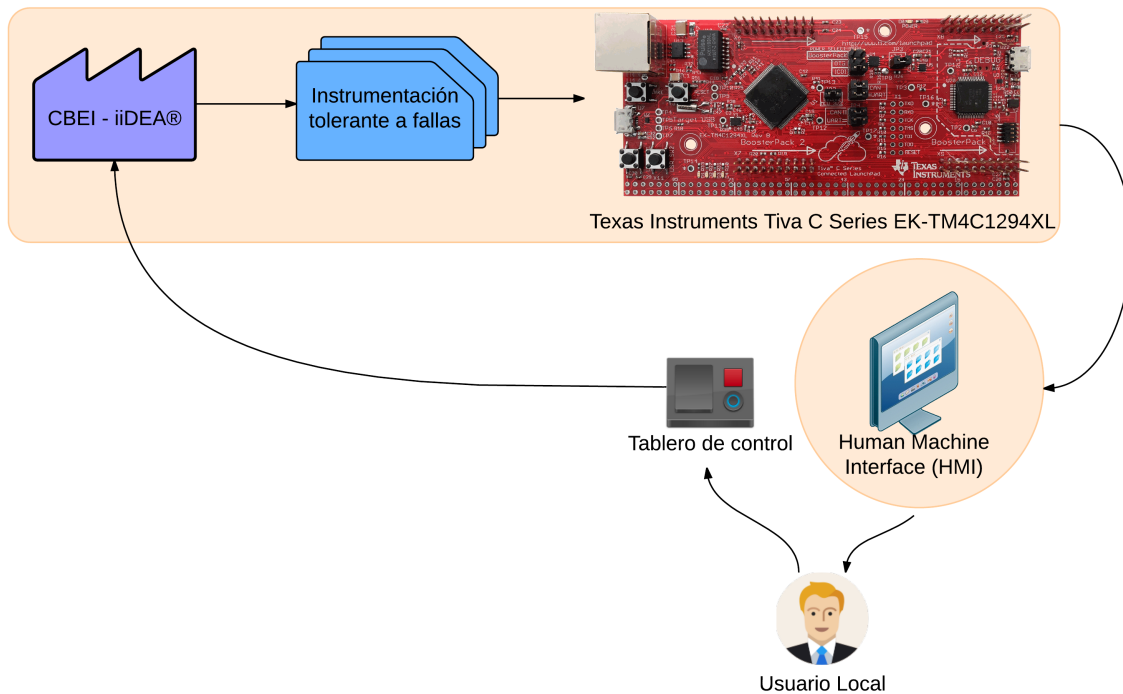


Figura 4.3: Sistema de Instrumentación de CBEI-iiDEA®

La Figura 4.3 muestra, de manera general, el sistema propuesto. En las siguientes secciones se analizará cada elemento, continuando con la metodología del FMEA de la subsección 4.2.2.

Por otro lado, el propósito específico de la aplicación del FMEA es la propuesta de un sistema redundante en *hardware* para las Unidades de Alimentación [*Power Supply Unit (PSU)*]. Esta propuesta se basa en dos criterios principales:

1. Históricamente, varios autores han señalado la importancia de la redundancia de PSU en baja, mediana y alta potencia [102], [117]
2. Como se mencionó en el capítulo introductorio de este trabajo, una de las experiencias generadas durante el diseño y aplicación de la primera versión del sistema de instrumentación, fue la necesidad de contar con sistemas de alimentación más robustos, flexibles, y libres de mantenimiento, no sólo con fines de continuar la experimentación en laboratorio, sino que, eventualmente, los principios de tolerancia a fallas fueran la base de un sistema fiable para experimentar en campo.

Para este fin, de acuerdo a lo evaluado y descrito en la subsección 3.8.3, se propone el uso de redundancia *fría* (Figura 3.12) por ser una técnica flexible y con requerimientos energéticos bajos, además de que al tratarse de un sistema de instrumentación con aplicaciones de registro y supervisión, en caso de lecturas anómalas como consecuencia de tiempos de indisponibilidad, éstos intervalos *muertos* no tienen consecuencias notables en la operación del sistema.

4.4. Fundamentos de Instrumentación

Con el fin de establecer las bases de los sistemas de Instrumentación, se hará una breve y general recapitulación de sus fundamentos prácticos. De manera general, la Instrumentación se define como el conjunto global de equipos y dispositivos que son capaces de proveer información sobre cantidades físicas, química o biológicas medibles (llamadas *variables físicas*) o estados [118].

Es importante no confundir a la Instrumentación, ciencia de la Ingeniería, con la *metrología*, ciencia que trata sobre “*la medición como el proceso cognitivo de obtención de información del mundo físico*” [119].

En su representación más elemental, un sistema de instrumentación como el mostrado en la Figura 4.4, contiene los siguientes elementos [120]:

Sensor Dispositivo que provee información sobre el estado de un sistema a partir de la medición de cierta variable física y su transformación en una señal eléctrica. Es importante mencionar que un sensor es un tipo de transductor, pero que no todo transductor es un sensor.

Procesamiento También llamado *acondicionamiento*, provee de ciertas condiciones a la señal de salida del sensor; entre las más comunes se encuentra el filtrado, amplificación y atenuación.

Almacenamiento/Visualización Dado que el propósito específico de los sistemas de instrumentación es la obtención de información, ésta puede ser visualizada o almacenada, para su posterior análisis.

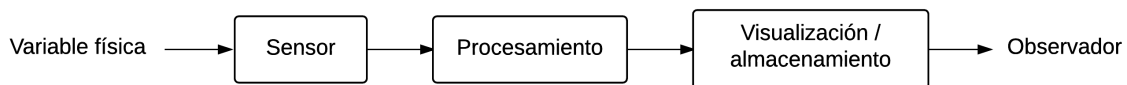


Figura 4.4: Diagrama general de sistema de instrumentación. Adaptada de [120]

4.4.1. Sensor

La calidad, costo y aplicación de un sensor, se relacionan con los siguientes parámetros [121]:

Especificaciones Aseveraciones del fabricante sobre las capacidades generales del sensor o instrumento en relación a los errores límite declarados.

Sensibilidad Razón de cambio de la variación de la variable independiente respecto a la variación de la variable dependiente.

Especificidad Es la habilidad del instrumento de distinguir la variable de interés entre otras variables ajenas.

Exactitud Se refiere a la relación de *cercanía* existente entre el valor verdadero y el valor medido.

Resolución Es el incremento más pequeño que puede medirse con certeza.

Incertidumbre Es la desviación existente entre el valor verdadero y el valor medido.

Precisión Es una medida de la repetibilidad de la medición. Una alta precisión indica la habilidad de replicar una medición dentro de límites estrechos. También puede definirse como la menor diferencia medible entre dos valores contiguos.

Rango de operación Se refiere a los extremos superior e inferior que el instrumento es capaz de medir. No sólo es relevante en relación a la seguridad del instrumento, sino al rango en que el fabricante garantiza las condiciones de precisión e incertidumbre.

Condiciones operativas Son las condiciones ambientales que el sensor, en correcta operación, es capaz de soportar.

Respecto a la taxonomía de los sensores de aplicación física, la Figura 4.5 ilustra la clasificación más general.

4.4.2. Procesamiento

De manera general, su función es la adaptación de la señal de salida del sensor, a las necesidades o requerimientos del elemento al cual está conectada, es decir, el último bloque del sistema define las características de las acciones que deberá realizar el elemento de procesamiento [123].

Es común que el bloque de visualización/registro requiera una tensión de entrada a bajas frecuencias y baja impedancia de entrada. En la adquisición de datos es común que este último elemento sea un Convertidor Analógico a Digital [*Analog to Digital Converter (ADC)*].

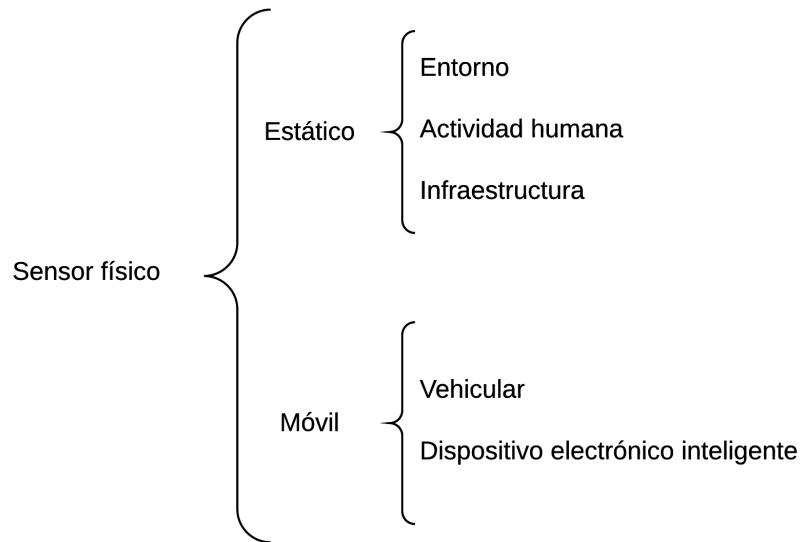


Figura 4.5: Taxonomía de sensores físicos. Adaptado de [122].

4.4.3. Visualización/Registro

Como se mencionó en la subsección anterior (subsección 4.4.2), uno de los elementos más comunes en esta etapa de los sistemas de Instrumentación es un ADC. Su función es la digitalización de señales analógicas, no sólo con el fin de enviar dichos datos de modo digital, sino también, con la opción de realizar procesamiento digital de señales.

Dentro de las características fundamentales de los ADC está el muestreo (*sampling*) y la asignación de resolución (*quantization*). A partir de estos dos principios la señal de tensión analógica, continua en el tiempo, es transformada en valores discretos.

La resolución de un ADC se refiere al menor cambio en tensión que se puede detectar; se define a partir de cierto número de bits (*binary digit*), con la siguiente ecuación:

$$Resolución = 2^n \tag{4.4.3.1}$$

Donde:

n Número de bits de ADC

4.5. Evaluación de sensores

4.5.1. Sensores de presión

Los tres principios de operación más comunes para la medición electrónica de presión, son los siguientes [124]:

Sensor de diafragma de metal Se trata de un cuerpo rígido que contiene a un diafragma conformado generalmente por acero inoxidable. Uno de los lados de dicho diafragma está en contacto con el medio; por el otro, existen una galga extensiométrica cuya deformación causada con la presión, es el principio fundamental de salida del sensor. Este tipo de sensores resulta muy estable, además de ser resistente a golpes y vibraciones.

Sensor de diafragma cerámica El cuerpo principal de este tipo de sensor está conformado por un material cerámico, generalmente óxido de aluminio. Una de las principales ventajas es que es altamente resistente a ambientes corrosivos, sin embargo, requiere elementos adicionales de sellado en su instalación.

Sensor piezo resistivo Este sensor consiste en un diafragma, conformado por resistores piezoresistivos, los cuales bajo presión, son deformables. Se instala en cuerpos generalmente de acero inoxidable, que a su vez contienen otro diafragma (de acero inoxidable) y un fluido de transmisión de presión. En los sensores de presión piezoeléctricos, el medio sólo está en contacto con el diafragma de acero inoxidable, el cual transmite la presión al fluido, y finalmente, al diafragma interno piezoresistivo.

Las descripciones y características anteriores se condensan en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1: Comparación entre sensores de presión

| Característica general | Filme delgado de metal | Filme delgado cerámico | Piezoeléctrico |
|---|------------------------|------------------------|----------------|
| Presión absoluta | No | Parcialmente | Sí |
| Rango de presión en niveles bajos | No | No | Sí |
| Rango de presión en niveles altos | Sí | No | No |
| Resistente a golpes y vibraciones mecánicas | Sí | Parcialmente | Parcialmente |
| Estable a largo plazo | Sí | Parcialmente | Sí |

4.5.2. Sensores de temperatura

Para medir la temperatura a partir de variables eléctricas, existen tres alternativas principales [124]: los Detectores resistivos de Temperatura [*Resistive Temperature Detector (RTD)*], termistores y termopares. Los termistores, a su vez, existen en dos clases diferentes de acuerdo a su coeficiente de temperatura, positivo o negativo (*Negative Temperature Coefficient (NTC)* y *Positive Temperature Coefficient (PTC)*). Estos dispositivos se abordarán en las siguientes subsecciones y en la Tabla 4.2.

RTD Consiste en una película delgada de platino o níquel. Su resistencia varía con la temperatura, y puede medir temperaturas de hasta 850 [°C]. Presentan una gran estabilidad a largo plazo y un comportamiento lineal en casi todo su rango de operación. Entre sus desventajas generales está el tiempo de respuesta lento, la baja sensibilidad, y que necesitan una corriente de excitación para su operación, lo que causa un incremento de temperatura indirecto en el dispositivo, mismo que puede afectar las lecturas obtenidas. Son los sensores más precisos, sin embargo, es el tipo de sensor más caro.

Termistor Un termistor es un resistor no lineal formado por óxidos metálicos que varían su resistencia con cambios de temperatura. Entre sus desventajas está la no linealidad, así como la temperatura máxima de operación general, que es de 200 [°C]. Su tiempo de respuesta es bueno y son más baratos que los RTD.

Termopar Su estabilidad decrece a largo plazo, y su precisión no es tan buena como la de los otros dos tipos de sensores (± 0.75 [°C]). Su uso en rangos de temperatura bajos (menores a 100 [°C]) no es recomendado debido a las pocas variaciones de tensión entre sus terminales, que es el principio de operación del mismo. Los mejores resultados en estabilidad y presión se obtienen en temperaturas mayores a los 250 [°C]. Aunque su precio es bajo, debido a estas características se propone que este tipo de sensores no sea utilizado para los fines que se persiguen.

Tabla 4.2: Comparación entre sensores de temperatura

| Característica | RTD | Termistor | Termopar |
|--------------------------|----------------|----------------|------------------------|
| Temperatura de operación | Hasta 850 [°C] | Hasta 200 [°C] | Mayor a 250 [°C] |
| Tiempo de respuesta | Bajo | Medio | Alta |
| Estabilidad | Buena | Buena | Decrece a largo plazo |
| Linealidad | Alta | No lineal | Generalmente no lineal |
| Resolución | 1 [°C] | ± 75 [°C] | 1 [°C] |
| Precisión | Alta | Buena | Buena |
| Precio | Alto | Medio | Bajo |

4.6. Localización de sensores

Retomando los elementos mostrados en la sección 2.8 relativos al Sistema Experimental de Generación de Vapor (Figuras 2.10 y 4.6) y sus condiciones de operación (Tabla 2.1), se propone la localización de sensores mostrada en la Tabla 4.3.

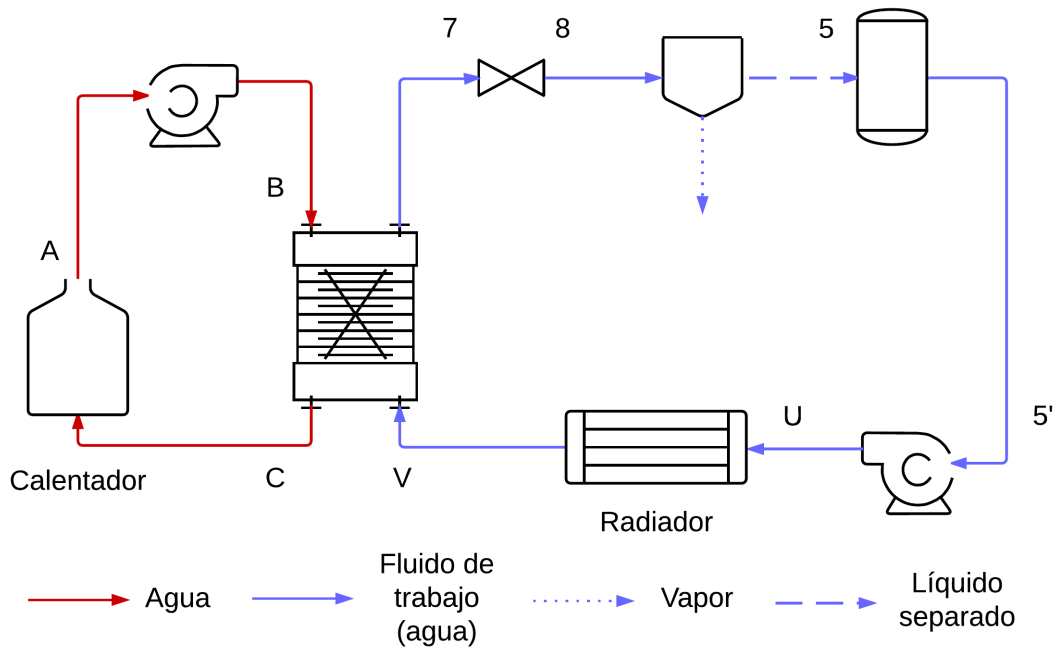


Figura 4.6: Sistema experimental de generación de vapor (repetida). Adaptado de [62].

Tabla 4.3: Localización de sensores

| Estado | Presión | Temperatura |
|--------|---------|-------------|
| A | | • |
| B | • | • |
| C | | • |
| 5 | • | • |
| 7 | • | • |
| 8 | • | • |
| U | | • |
| V | • | • |

4.7. Selección final de sensores

Durante el análisis de los puntos específicos a registrar, se concluyó que el uso de sensores de presión absoluta proporciona la mayor versatilidad de acuerdo a los requerimientos del CBEI-iiDEA[®], y al mismo tiempo, permitir su futura instalación en proyectos paralelos del Grupo iiDEA[®] y en prototipos futuros del CBEI-iiDEA[®] durante la etapa de escalamiento. Las características generales de los sensores empleados se muestra a continuación.

Honeywell PX2EN1XX100PAAAX La línea de sensores piezoresistivos PX2, de Honeywell fue dada a conocer en mayo de 2013 durante la *Sensor + Test Measurement Fair*, en Nurnberg, Alemania. El propósito fundamental de esta serie es ofrecer soluciones de ingeniería para la medición de presión, específicamente para soportar medios medianamente agresivos, como refrigerantes, fluidos de transmisiones hidráulicas, líquido de frenos hidráulicos, aceite para motores, agua dura, y aire comprimido [125].

El hecho de que la señal de salida de estos sensores sea proporcional (*ratiometric output*) permite a los fabricantes minimizar costos de producción debido a la minimización de componentes internos [124]. La Tabla 4.4 muestra las características generales de este sensor.

Tabla 4.4: Características generales de sensor de presión Honeywell PX2EN1XX100PAAAX

| | |
|---------------------------------|--|
| Conexión | 1/4-18 NPT |
| Rango de presión | [0, 100] [psia] |
| Tensión de alimentación | 5[V] |
| Tipo de presión | Presión absoluta |
| Tipo de salida | Salida proporcional a 5 [V], de 10% a 90% (<i>ratiometric output</i>) |
| Temperatura de operación | [−40, 125] [°C] |
| Rango de temperatura compensada | [−40, 125] [°C] |
| Precisión | ± 0.25 % |
| Tiempo de respuesta | < 2 [ms] |

Para el caso de los sensores de temperatura, se tomó la decisión de emplear Detectores Resistivos de Temperatura [RTD]. En la Tabla 4.5 se detallan las características del sensor **USW3577**, de US Sensors.

Tabla 4.5: Características generales de sensor de temperatura USW3577

| | |
|------------------------------|-------------------|
| Resistencia nominal @ 0 [°C] | 2000 [Ω] |
| Salida de tensión | Lineal |
| Número de hilos | 4 hilos |
| Precisión promedio | ± 0.25 [°C] |
| Temperatura de operación | [-50, 180] [°C] |

4.8. Selección de componentes electrónicos

Hasta ahora se han definido los tipos y modelos de sensores a emplear, así como su localización dentro del ciclo. Por otro lado, uno de los elementos determinantes es la selección de fuentes de alimentación a partir de las necesidades energéticas de consumo para cada uno. Como consecuencia de este hecho, se presentan los criterios de selección empleados para dichos elementos electrónicos.

4.8.1. Criterios de selección para componentes electrónicos

Con el propósito de generar un sistema de alto nivel, es prudente seleccionar elementos que, de manera independiente, posean alta fiabilidad. Algunos de los criterios para su selección son los siguientes [76]:

1. Evaluar la aplicación específica (función requerida), condiciones de operación, objetivos de fiabilidad y seguridad
2. Especificar las propiedades del componente considerado, así como sus límites, posible vida útil, comportamiento a largo plazo, y parámetros específicos relevantes
3. Posibilidad de pruebas aceleradas
4. Resultados en pruebas de calidad
5. Experiencia en operaciones de campo
6. Influencia del tiempo de operación en reducción de potencia
7. Problemas de diseño potenciales, como la sensibilidad de parámetros de operación o Compatibilidad Electromagnética (EMC)
8. Problemas potenciales de producción (ensamble, prueba, manejo, almacenamiento)
9. Consideraciones de compra (Costos, tiempos de entrega, disponibilidad, proveedores, calidad)

4.8.2. Tipos de encapsulado

De manera general, los IC pueden clasificarse de acuerdo a su hermeticidad [76]. Los encapsulados *herméticos* son aquellos encapsulados cuyo material exterior es cerámico o metálico; los *no herméticos* presentan encapsulado plástico.

El encapsulado *no hermético* es, generalmente, menos costoso, menos sensitivos a choques térmicos o colisiones mecánicas pero son permeables a la humedad. Para que este tipo de encapsulado pueda ser aplicado, deben cumplirse ciertas condiciones para garantizar que el uso de este tipo de encapsulado será fiable. Esencialmente, las condiciones son las siguientes:

1. Si la operación del IC será estimada en menos de 10 años de operación continua, en una locación no corrosiva o marginalmente corrosiva, la humedad relativa no deberá ser mayor a 70 %, y la temperatura de juntura no deberá sobrepasar los 100 [°C].
2. Si se planea una operación intermitente durante un periodo menor a 10 años, en un ambiente no corrosivo, sin condensación en el IC, la humedad relativa no deberá sobrepasar el 60 % bajo la misma temperatura de juntura que la condición anterior.

4.9. Fuentes de alimentación

4.9.1. Definición de Configuración de Entrada

En cualquier topología aplicable para fuentes de alimentación, es común definir requerimientos para la entrada general previa al sistema de alimentación final.

Esta sección, conocida como Configuración de Entrada, contiene los siguientes elementos generales [126]:

- Cable de alimentación y receptáculo
- Interruptor general de encendido
- Protección de cortocircuito (fusible) y sobrecarga (termistor con coeficiente de temperatura negativo NTC, limitador de corriente)
- Filtro de Interferencia Electromagnética [*Electromagnetic Interference (EMI)*]
- Puente de entrada (Rectificador de onda completa o Duplicador de tensión)
- Capacitor de carga (*Bulk capacitor*)

4.9.2. Fuentes de tensión

A pesar de que los reguladores lineales de tensión tienen una eficiencia baja cuando se les compara con los reguladores conmutados, los primeros ofrecen una significativa ventaja en su diseño y costo [127].

La eficiencia de este tipo de reguladores está definida a partir de la siguiente ecuación, considerando que la corriente de entrada y salida es la misma:

$$\eta = \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad (4.9.2.1)$$

Donde:

η Eficiencia

V_{out} Tensión de salida

v_{in} Tensión de entrada

De la ecuación anterior se observa que si la caída de tensión en la regulación aumenta, la eficiencia disminuirá y la mayoría de la energía suministrada al regulador se disipará en forma de calor. En el caso de los reguladores lineales de tensión, existe una tensión de entrada mínima para garantizar la correcta regulación de tensión a la salida.

En el caso de los Reguladores de Baja Caída de Tensión [Linear Dropout Regulator (LDO)], la diferencia mínima requerida entre V_{out} y V_{in} es menor, ofreciendo una mayor eficiencia [128].

Como consecuencia de lo anterior, se seleccionaron LDO fabricados por Texas Instruments (TI), correspondientes a la familia TPS. La Tabla 4.6 muestra algunas de sus características fundamentales.

Uno de los atributos notables de la selección de estos LDO es que poseen habilitación externa (lógica negativa) e indicador de operación correcta [*Power Good (PG)*]. El primero de los atributos permitirá la habilitación secuencial de un primer bus de 5[V] y un segundo bus de 3.3[V]; el segundo, permitirá identificar a las unidades anómalas, para después habilitar a los LDOs redundantes.

Tabla 4.6: Características LDO TPS7233 (3.3 [V]) y TPS7250 (5 [V])

| | |
|-----------------------------|---|
| V_{in} mínima (TPS7233) | 4 [V] |
| V_{in} mínima (TPS7250) | 5.4 [V] |
| V_{in} máxima | 10 [V] |
| Precisión promedio | [2-3] % |
| Corriente de fuga | 0.18 [mA] |
| Temperatura de operación | [−40, 125] [°C] |
| Encapsulado | PDIP |
| Características adicionales | Habilitación externa Protección de sobrecorriente Indicador [PG] Apagado térmico |

4.9.3. Fuentes de corriente

El principio de alimentación de los [RTD] de cuatro hilos se muestra en la Figura 4.7, donde se observa la corriente de alimentación a través de dos hilos. La salida de tensión se obtiene en los dos hilos restantes. De acuerdo con la literatura, esta corriente debe ser menor a 1 [mA] con el fin de evitar un aumento de temperatura en el RTD que vicie los resultados obtenidos. [129].

En base a este hecho, se consideró el uso de Diodos Reguladores de Corriente [*Current Regulator Diode (CRD)*], también llamados Diodos Limitadores de Corriente [*Current Limiting Diode (CLD)*], o bien, Diodos de Corriente Constante [*Constant Current Diode (CCD)*]. El principio de operación de estos dispositivos es un Transistor de Efecto de Campo de Juntura [*Junction Gate Field-Effect Transistor (JFET)*] de canal n con las terminales *Gate* y *Source* conectadas entre sí. Este arreglo permite una limitación de corriente constante independiente de la tensión aplicada.

Dentro de los parámetros más importantes en la selección del CLD se encuentran los siguientes [130]:

Máxima tensión constrictiva (*Maximum Limiting Voltage*) V_L Se refiere a la tensión a la que el diodo comienza a regular la corriente que fluye a través de él.

Tensión máxima de operación (*Peak Operating Voltage*) POV Tensión máxima de polarización directa en el diodo.

Corriente de regulación *Pinch-off current* I_p Valor de la corriente de regulación del diodo para una tensión entre V_L y POV .

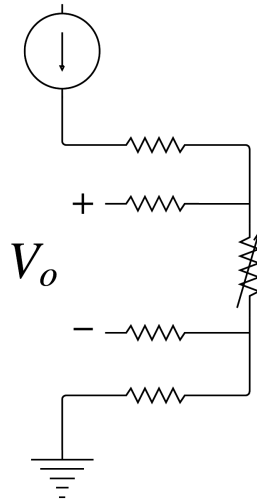


Figura 4.7: Principio de operación de RTD de 4 hilos

Dada la naturaleza de los dispositivos, la disponibilidad directa en el país es nula. Como consecuencia de lo anterior, se recurrió al distribuidor extranjero *Mouser Electronics*, al ser uno de los más grandes distribuidores de componentes electrónicos y que tiene dentro de su catálogo los CLD.

Una vez seleccionado el proveedor, el siguiente paso en el proceso de selección fue conocer, de acuerdo a los valores nominales de los fabricantes, cuáles dispositivos se encontraban en existencia, y cuya corriente de regulación fuera menor a 1 [mA], dadas las consideraciones abordadas en la sección .

Los dispositivos disponibles y que satisfacían la condición anterior, eran aquellos con las siguientes corrientes de regulación: 0.33, 0.47, 0.91 y 1 [mA]. Por otro lado, al momento de adquirir los sensores de temperatura USW3577, el fabricante proporcionó un documento adjunto con la caracterización del dispositivo. La caracterización es un proceso mediante el cual, se modela el dispositivo en base a variables dependientes e independientes. En este caso, el documento proporcionado relacionaba la temperatura como función de la resistencia, tal que:

$$T = f(V) \tag{4.9.3.1}$$

Donde:

T Temperatura [°C]

V Diferencia de potencial [V]

Con los dispositivos comerciales disponibles se realizó la Figura 4.8. Las funciones se modelaron en función de la tensión de salida, aplicando la Ley de Ohm, tal que:

$$I = \frac{V}{R} \quad (4.9.3.2)$$

Donde:

I Intensidad de corriente eléctrica [A]

V Diferencia de potencial [V]

R Resistencia [ω]

Por lo tanto:

$$V = RI \quad (4.9.3.3)$$

Substituyendo la ecuación 4.9.3.3 en la ecuación 4.9.3.1:

$$T = f(R, I) = RI \quad (4.9.3.4)$$

$$T = RI \quad (4.9.3.5)$$

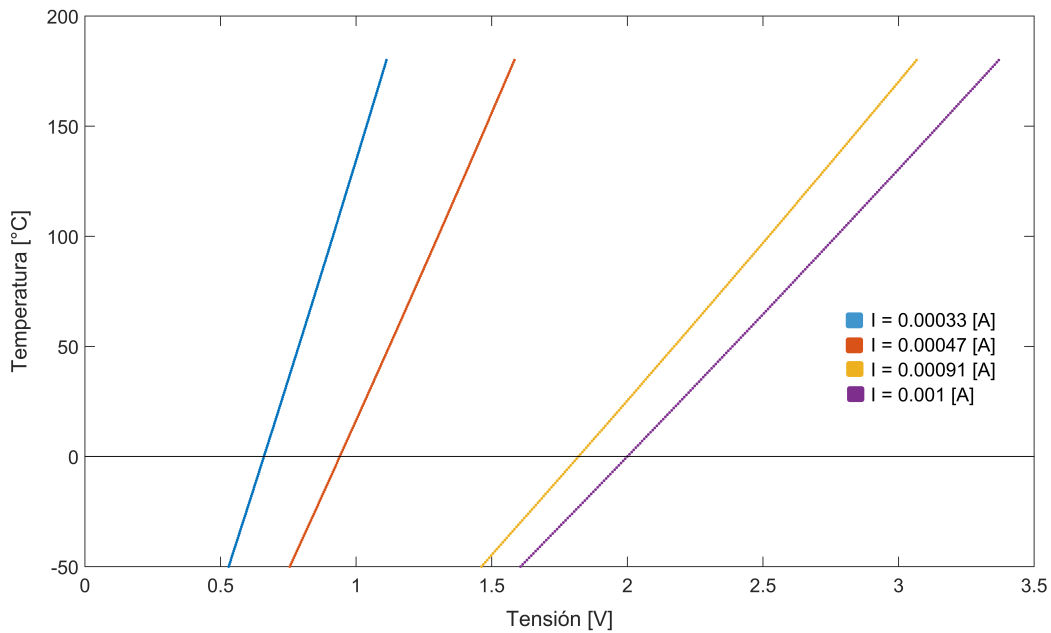


Figura 4.8: $T = f(R, I)$ en RTD

Al observar la Figura 4.8 pueden deducirse las siguientes afirmaciones:

- Evidentemente, la tendencia lineal se conserva y se concluye que es posible determinar una función lineal que relacione la tensión de salida con la temperatura del RTD
- Al incrementar la corriente de alimentación en el RTD, el rango de tensión de salida (*output span*) aumenta
- El valor de corriente que otorga un mayor rango en la tensión de salida puede determinarse a partir de la función lineal de ajuste que tenga la menor pendiente
- Variaciones de corriente pequeñas tienen como consecuencia, una variación considerable en la tensión de salida para una misma temperatura

El criterio final de selección se basa en el hecho de que, de acuerdo a las especificaciones del fabricante, el diodo 1N5290, correspondiente a 0.47 [mA], tiene la mayor estabilidad en la limitación de corriente respecto a variaciones de temperatura. Se observa que el *span* no es muy bueno (poco más de 0.5 [V] entodo el rango de operación) sin embargo, es posible realizar un escalamiento con el fin de aumentar el extremo superior.

El modelo lineal, ajustado a dicha recta, obtenido a través del *software* MATLAB[®] R2015a, es el siguiente:

$$T = f(V) = 277.5V - 260.8 \quad (4.9.3.6)$$

Donde:

T Temperatura [°C]

V Diferencia de potencial [V]

4.10. Sistema de Adquisición de Datos (DAQ)

Para la última etapa del sistema de instrumentación se realizó un DAQ basado en la modificación del programa comercial PLX-DAQ[®]. Este programa tiene la función de exportar los valores registrados por el sistema a una hoja de cálculo de *Microsoft Excel*[®] mediante transmisión y recepción universal asíncrona [*Universal Asynchronous Receiver/Transmitter (UART)*].

Su operación permite filtrar las lecturas a partir de la variable física de interés o registrar presión y temperatura de manera simultánea. Las Figuras 4.9 y 4.10 muestran la operación y detalle de la interfaz.

| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J |
|----|---------------|-------------------------|------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|---------------------|---------------------------|----------------|
| | Hora | P man 1 [kPa] / T 1 [C] | P man 2 [kPa] / T3 [C] | PA [kPa] / T4 [C] | P2 [kPa] / T5 [C] | P3 [kPa] / T6 [C] | P4 [kPa] / TA [C] | PVac [kPa] / TB [C] | Gasto [l/h] / TBoiler [C] | Filtro |
| 1 | 02:59:59 p.m. | -536.23 | -545.98 | 71.82 | 144.95 | 71.69 | 778.27 | 71.64 | 992.73 | Presion y gast |
| 2 | 02:59:59 p.m. | 39.29 | 41.6 | -91.68 | 44.22 | 48.57 | 52.97 | 38.19 | 120.38 | Temperatura |
| 3 | 03:00:02 p.m. | -537.07 | -545.91 | 72.8 | 145.8 | 70.26 | 778.2 | 69.63 | 1298.18 | Presion y gast |
| 4 | 03:00:02 p.m. | -38.82 | 43.17 | -87.96 | 41.75 | 50.21 | 54.18 | 38.39 | 119.08 | Temperatura |
| 5 | 03:00:05 p.m. | -536.97 | -545.74 | | | | | 72.03 | 992.73 | Presion y gast |
| 6 | 03:00:05 p.m. | 37.61 | 43.5 | | | | | 39.83 | 114.5 | Temperatura |
| 7 | 03:00:08 p.m. | -536.49 | -545.26 | | | | | 75.85 | 992.73 | Presion y gast |
| 8 | 03:00:08 p.m. | 38.42 | 42.2 | | | | | 39.06 | 117.64 | Temperatura |
| 9 | 03:00:11 p.m. | -536.38 | -545.5 | | | | | 73.93 | 992.73 | Presion y gast |
| 10 | 03:00:11 p.m. | 40.32 | 40.79 | | | | | 39.04 | 115.02 | Temperatura |
| 11 | 03:00:15 p.m. | -536.45 | -545.72 | | | | | 73.2 | 1003.64 | Presion y gast |
| 12 | 03:00:15 p.m. | 36.01 | 43.64 | | | | | 36.73 | 118.51 | Temperatura |
| 13 | 03:00:18 p.m. | -537.02 | -546.13 | | | | | 70.49 | 992.73 | Presion y gast |
| 14 | 03:00:18 p.m. | 38.12 | 43.21 | | | | | 38.41 | 115.2 | Temperatura |
| 15 | 03:00:21 p.m. | -537.24 | -546.22 | | | | | 72.7 | 981.82 | Presion y gast |
| 16 | 03:00:21 p.m. | 39.22 | 43.97 | | | | | 38.77 | 112.25 | Temperatura |
| 17 | 03:00:24 p.m. | -537.17 | -545.72 | | | | | 74.72 | 992.73 | Presion y gast |
| 18 | 03:00:24 p.m. | 35.99 | 43.59 | | | | | 37.13 | 119.13 | Temperatura |
| 19 | 03:00:27 p.m. | -536.64 | -545.45 | | | | | 71.76 | 992.73 | Presion y gast |
| 20 | 03:00:27 p.m. | 39.72 | 41.28 | | | | | 36.39 | 118.79 | Temperatura |
| 21 | 03:00:31 p.m. | -536.33 | -545.21 | | | | | 72.18 | 981.82 | Presion y gast |
| 22 | 03:00:31 p.m. | 38.10 | 43.01 | | | | | 34.38 | 117.71 | Temperatura |
| 23 | 03:00:34 p.m. | -536.93 | -545.77 | | | | | 73.1 | 992.73 | Presion y gast |
| 24 | 03:00:34 p.m. | 39.06 | 39.62 | | | | | 39.35 | 117.38 | Temperatura |
| 25 | 03:00:37 p.m. | -537.31 | -546.13 | | | | | 75.69 | 1003.64 | Presion y gast |
| 26 | 03:00:37 p.m. | 38.41 | 42.8 | | | | | 38.8 | 119.69 | Temperatura |
| 27 | 03:00:40 p.m. | -536.88 | -545.4 | | | | | 72.45 | 1003.64 | Presion y gast |
| 28 | 03:00:40 p.m. | 39.83 | 42.85 | | | | | 36.91 | 118.69 | Temperatura |
| 29 | 03:00:43 p.m. | -536.47 | -545.48 | | | | | 72.08 | 1003.64 | Presion y gast |
| 30 | 03:00:43 p.m. | 43.55 | 45.45 | -81.78 | 41.69 | 44.84 | 83.64 | 38.06 | 117.95 | Temperatura |
| 31 | 03:00:47 p.m. | -536.26 | -545.6 | 73.02 | 147.54 | 71.64 | 777.13 | 72.06 | 1003.64 | Presion y gast |
| 32 | | | | | | | | | | |

Figura 4.9: Adquisición de datos CBEI-iiDEA®



Figura 4.10: Detalle de interfaz

4.11. Tarjeta de desarrollo

Como tarjeta de desarrollo, se propone el uso de la tarjeta Tiva EK-TM4C1294XL, desarrollada por TI. El microprocesador de la tarjeta (TM4C1294NCPDT) forma parte de la familia Cortex-M4, de ARM®), el cual posee un rendimiento de alta eficiencia, bajo consumo de energía, bajo costo, y facilidad de uso. El mercado objetivo de este procesador es ofrecer soluciones en Control, Ingeniería Automotriz, Supervisión, Automatización Industrial y Sistemas Embebidos.

Por otro lado, continuando lo descrito en la sección 4.1.1, el hecho de que esta tarjeta de desarrollo sea de bajo costo y posea conectividad a través de *USB 2.0*, *USB 3.0* y *Ethernet*, ofrece la posibilidad de la eventual integración con el área de Telemetría y Control Remoto.

Las características específicas de la tarjeta de desarrollo se detallan en la Tabla 4.7.

Tabla 4.7: Características de tarjeta de desarrollo EK-TM4C1294XL

| Procesador | TM4C1294NCPDT |
|--|------------------------------------|
| Unidad de Procesamiento Central | ARM Cortex-M4 de 32 bits a 120 MHz |
| Memoria Flash | 1 MB |
| Memoria SRAM | 256 kB |
| Memoria EEPROM | 6 kB |
| ADC | 20 canales, 12 bits |
| <i>General Purpose Input Output (GPIO)</i> | 90 |
| Temperatura de operación | [−40, 85] [°C] |

4.12. Límites y restricciones

Retomando la idea general propuesta del Sistema Integral de Instrumentación, Control Remoto y Telemetría, mostrado en la Figura 4.1, y estableciendo el sistema a diseñar y evaluar, mostrado en la Figura 4.3, es imperante delimitar qué elementos formarán parte del FMEA así como sus restricciones.

La consideración más relevante hasta ahora es que la tarjeta de desarrollo EK-TM4C1294 se asumirá como un elemento *perfecto*, no influyente en la operación de los PSU. Evidentemente esta consideración pretende limitar la complejidad del sistema y establecer las condiciones para la aplicación de la ecuación 3.8.3.1, además de que la tasa de averías para este elemento no está disponible, y el fabricante sólo provee información de fiabilidad acerca del procesador TM4C1294NCPDT.

4.13. Fallas en componentes eléctricos y electrónicos

De manera general, los componentes eléctricos y electrónicos pueden presentar averías en los siguientes modos [131]:

- Cortocircuito: Los componentes más comunes que sufren de este modo de avería son los capacitores, diodos y transistores.
- Circuito abierto: Resistores y cristales a menudo fallan de este modo
- Desempeño degradado: Los Rectificadores Controlados de Silicio [*Silicon-Controlled Rectifier (SCR)*] y los capacitores de aluminio son propensos a presentar esta falla
- Falla funcional: Generalmente se presenta en relevadores e inductores

Para el caso específico de los dispositivos semiconductores, se encuentran los siguientes [132]:

- Fallas relacionadas con encapsulado
 - Esfuerzos mecánicos/térmicos
 - Corrosión inducida por ambientes húmedos
 - Radiación de partículas α
- Fallas relacionadas con Silicio (Si)
 - Sensibilidad a esfuerzos térmicos y eléctricos
 - Contaminación
 - Defectos cristalográficos

4.14. Consideraciones para análisis de fiabilidad

Durante el análisis se realizarán las siguientes consideraciones:

1. La Tasa de averías λ es constante
2. La fiabilidad de cada componente obedece a la Ley Exponencial de Falla (Ecuación 3.6.7.1)
3. Los componentes n -ésimos son idénticos
4. Los componentes n -ésimos, así como sus tasas de averías son estadísticamente independientes, es decir, la probabilidad de ocurrencia de falla en cierto elemento es independiente de la avería de otro elemento redundante

5. La influencia humana, así como anomalías intencionales/maliciosas y fallas catastróficas, no son consideradas
6. Las fallas localizadas se deben a causas intrínsecas

Por otro lado, para el análisis de fiabilidad de la topología de redundancia propuesto (Redundancia en espera), se tomarán en cuenta todas las consideraciones desarrolladas en la subsección 3.8.3.

4.15. Diseño de sistema de Instrumentación

La Figura 4.12 ilustra el diagrama esquemático simplificado del sistema propuesto. A partir del bus de 5 [V] se alimenta a los sensores de presión Honeywell PX2EN1XX100PAAAX, mientras que en el bus de 3.3 [V] se tiene una tensión suficiente para que la corriente de operación del CLD se mantenga en 0.47 [mA] y alimente a los sensores USW3577.

4.16. Diagrama de Bloques de Fiabilidad [Reliability Block Diagram (RBD)]

A partir del diagrama esquemático simplificado presentado en la sección anterior (Sección 4.15) se generó el RBD mostrado en la Figura 4.11. Por otro lado, la Tabla 4.8 incluye la tasa de averías de cada componente, los cuales se discuten en la sección 4.17 y se detallan en el Apéndice A.

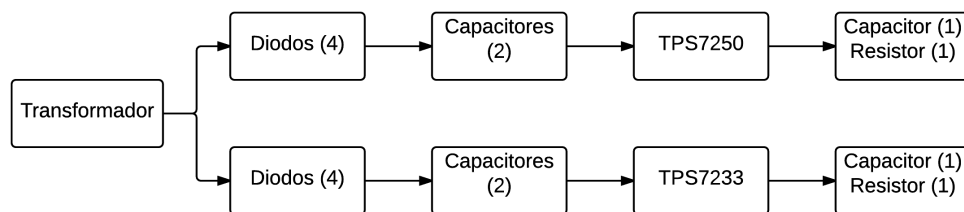


Figura 4.11: Diagrama de Bloques de Fiabilidad

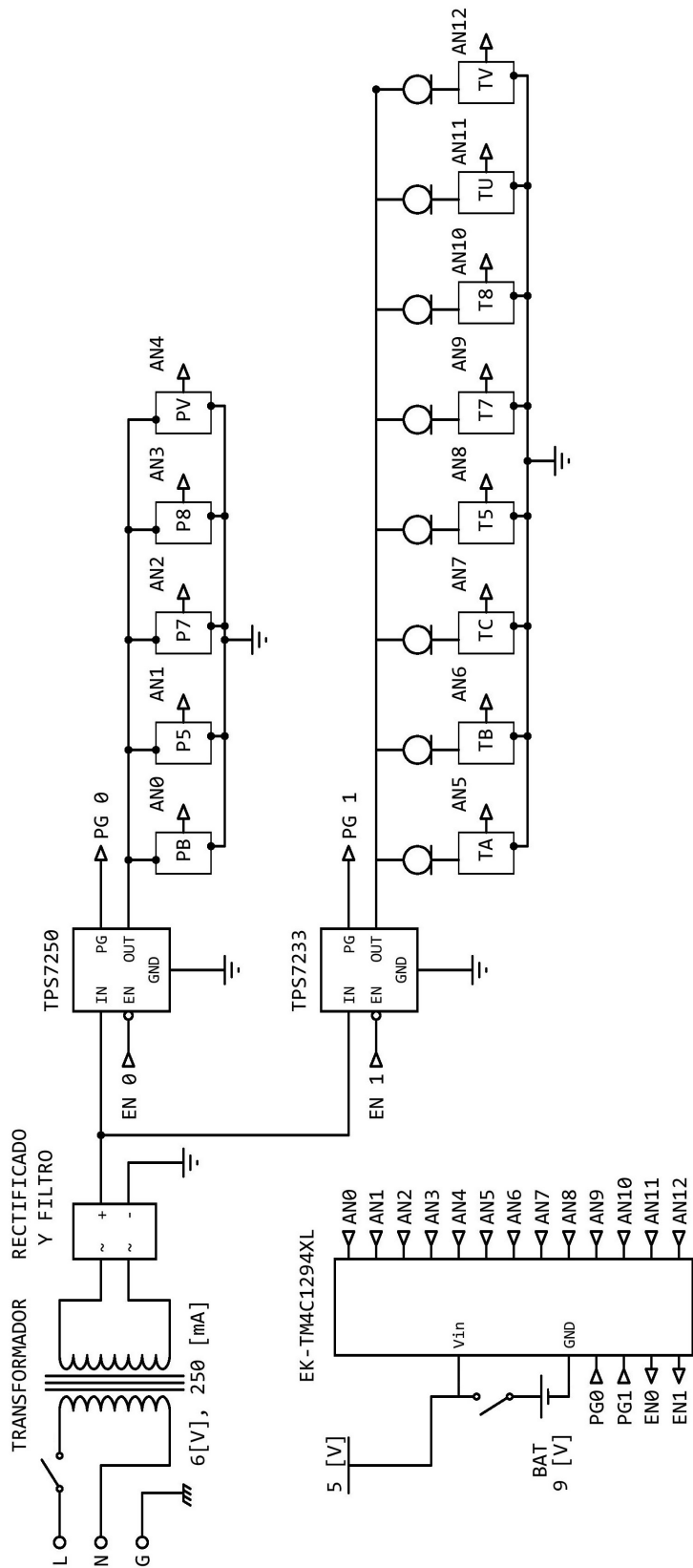


Figura 4.12: Diagrama esquemático simplificado de sistema de instrumentación

Tabla 4.8: Tasa de averías de componentes

| i | Elemento | λ $\left[\frac{\text{averías}}{\text{hora}} \right]$ |
|-----|---------------|---|
| 1 | Transformador | 5×10^{-7} |
| 2 | Diodo | 2.2×10^{-10} |
| 3 | Capacitor | 5×10^{-8} |
| 4 | LDO | 2.1×10^{-9} |
| 5 | Resistor | 5×10^{-8} |

4.17. Tasa de averías de componentes

En el diseño propuesto en la subsección 4.15, se aprecia que, además de los elementos principales (LDO, tarjeta de desarrollo), existen ciertos elementos genéricos (resistores, capacitores, diodos, transformadores). De acuerdo con algunas guías genéricas de fiabilidad de componentes [133], en resistores y capacitores cuyo valor nominal es fijo, la tasa de averías es realmente baja, en un intervalo de $[0.001 - 0.005]\%$ por cada 1,000 horas de operación; por otro lado, los transformadores se encuentran en un intervalo comprendido entre $[0.01 - 0.05]\%$ para el mismo tiempo requerido.

Lo anterior significa que en el caso de resistores y capacitores, para una muestra de 1,000 elementos en operación durante 1,000 horas, en el peor de los casos, habrán fallado 5 elementos. Para el caso de los transformadores, bajo el mismo tiempo de operación, habrán fallado como máximo 5 de 100 elementos.

Para el caso de diodos rectificadores generales, de acuerdo al estándar MIL-S-1950 [134], se consideran 0.0022 averías por cada 10^6 horas-dispositivo.

4.17.1. Fiabilidad de componentes pasivos

En conclusión, la tasa de averías de los componentes genéricos mencionados están definidas por las siguientes expresiones:

Capacitores y resistores

$$\lambda_{cap,res} = \frac{\text{Averías}}{\text{Tiempo total de operación}} \quad (4.17.1.1)$$

$$\lambda_{cap,res} = \frac{Averías}{Número\ de\ dispositivos \cdot Número\ de\ horas} \quad (4.17.1.2)$$

$$\lambda_{cap,res} = \frac{0.005[averías]}{1000 \cdot 100 [hora \cdot dispositivo]} \quad (4.17.1.3)$$

$$\lambda_{cap,res} = 5 \times 10^{-8} \left[\frac{averías}{hora} \right] \quad (4.17.1.4)$$

Diodo

$$\lambda_{diodo} = \frac{Averías}{Número\ de\ dispositivos \cdot Número\ de\ horas} \quad (4.17.1.5)$$

$$\lambda_{diodo} = \frac{0.0022[averías]}{10^6 [hora \cdot dispositivo]} \quad (4.17.1.6)$$

$$\lambda_{diodo} = 2.2 \times 10^{-10} \left[\frac{averías}{hora} \right] \quad (4.17.1.7)$$

Transformador

$$\lambda_{transf} = \frac{Averías}{Número\ de\ dispositivos \cdot Número\ de\ horas} \quad (4.17.1.8)$$

$$\lambda_{cap,res} = \frac{0.05[averías]}{1000 \cdot 100 [hora \cdot dispositivo]} \quad (4.17.1.9)$$

$$\lambda_{cap,res} = 5 \times 10^{-7} \left[\frac{averías}{hora} \right] \quad (4.17.1.10)$$

4.17.2. Fiabilidad de componentes semiconductores

A partir de la consulta de datos de fiabilidad de los LDO (TI) y los CLD (*Central Semiconductor*) (detalladas en el Apéndice A) se tienen las siguientes tasas de avería.

Tarjeta de desarrollo (Procesador TM4C1294NCPDT)

$$\lambda_{tiva} = \frac{2.41[averías]}{1 \times 10^9 [hora \cdot dispositivo]} \quad (4.17.2.1)$$

$$\lambda_{tiva} = 2.41 \times 10^{-9} \left[\frac{averías}{hora} \right] \quad (4.17.2.2)$$

TPS7250 y TPS7233

$$\lambda_{TPS7250,TPS7233} = \frac{2.1[\text{averías}]}{1 \times 10^9[\text{hora} \cdot \text{dispositivo}]} \quad (4.17.2.3)$$

$$\lambda_{TPS7250,TPS7233} = 2.1 \times 10^{-9} \left[\frac{\text{averías}}{\text{hora}} \right] \quad (4.17.2.4)$$

1N5290

$$\lambda_{cld} = \frac{2.3[\text{averías}]}{1 \times 10^9[\text{hora} \cdot \text{dispositivo}]} \quad (4.17.2.5)$$

$$\lambda_{cld} = 2.3 \times 10^{-9} \left[\frac{\text{averías}}{\text{hora}} \right] \quad (4.17.2.6)$$

Los resultados anteriores se condensan en la Tabla 4.9.

Tabla 4.9: Fiabilidad de sistema propuesto, $t = 87660$ horas

| i | Elemento | λ | $R_i(t)$ |
|-----|---------------|-----------------------|----------|
| 1 | Transformador | 5×10^{-7} | 0.9571 |
| 2 | Diodo | 2.2×10^{-10} | 0.99998 |
| 3 | Capacitor | 5×10^{-8} | 0.995626 |
| 4 | LDO | 2.1×10^{-9} | 0.999815 |
| 5 | Resistor | 5×10^{-8} | 0.995626 |

4.17.3. Fiabilidad de sensores Honeywell PX2EN1XX100PAAAX y USW3577

Uno de las asunciones realizadas es que los sensores empleados (PX2EN1XX100PAAAX y USW3577) tienen una fiabilidad tan alta que se considera que durante el periodo propuesto de la misión, éstos no fallarán.

La razón de esta consideración es que en las consultas realizadas a Honeywell sobre la fiabilidad de estos sensores, se recibió un reporte oficial sobre las pruebas de calidad realizadas a esta serie de sensores, asegurando su funcionabilidad en 10 millones de ciclos de presión en su rango nominal y hasta 1 millón de ciclos de presión sin falla en un rango superior al nominal; como elemento adicional se confirmó que Honeywell no proporciona valores de tasa de averías o MTTF.

Por otro lado, para el caso de los sensores USW3577, al comunicarse con U.S. Sensors cuestionando la fiabilidad del sensor, se recibió como respuesta la notificación de que U.S. Sensors no proporciona datos sobre fiabilidad en sus productos; sin embargo, se recibió una gráfica de la variabilidad de la resistencia nominal del RTD a lo largo de más de 1000 horas continuas de operación, donde se observa que su variación es mínima. Ambos reportes se detallan en la sección de Anexos de este trabajo.

4.18. Cálculo de fiabilidad del sistema

A partir del RBD de la Figura 4.11, se tiene el cálculo de fiabilidad para cada rama y sistema integral.

4.18.1. Fiabilidad de rama 1 y 2, independientes

$$R(t) = (R_{diodo})^4 \cdot (R_{capacitor})^3 \cdot (R_{resistor}) \cdot (R_{LDO}) \quad (4.18.1.1)$$

$$R_{1,2}(t) = 0.982364 \quad (4.18.1.2)$$

4.18.2. Fiabilidad de ramas 1 y 2, en paralelo

$$R_{paralelo} = 1 - (1 - 0.982364)^2 \quad (4.18.2.1)$$

$$R_{paralelo} = 0.999688 \quad (4.18.2.2)$$

4.18.3. Integración final

$$R_{final}(t) = R_{transformador} \cdot R_{paralelo} \quad (4.18.3.1)$$

$$R_{final}(t) = 0.956818 \quad (4.18.3.2)$$

4.19. Propuesta de sistema redundante

A partir del resultado mostrado en la Ecuación 4.18.3.2, se observa que a pesar de que los componentes electrónicos usados tienen una fiabilidad relativamente alta, la integración no satisface la fiabilidad de los sistemas de alto nivel ($R(t) > 99\%$). Por lo anterior, se hace la siguiente propuesta de redundancia en hardware para PSUs.

4.19.1. Redundancia en espera (*standby*)

A partir del desarrollo realizado en la sección 3.8.3, en la que se discuten los atributos de la redundancia en espera, se concluye que esta alternativa de redundancia en *hardware* puede ser aplicada en el sistema inicial propuesto debido a la existencia de elementos de repuesto en condición de bajo consumo de energía. En la Figura 4.13 se retoma el diagrama conceptual de la redundancia en espera discutido en la sección 3.8.3; por otra parte, en la Figura 4.14 se observa la propuesta de diseño equivalente. Nótese que los colores identifican al elemento equivalente de acuerdo a la función específica que desempeñan.

Los módulos de entrada corresponden a las fuentes de alimentación (LDO) para cada una de las tensiones especificadas (3.3, 5.0 [V]). Por otro lado, la Unidad de Detección de Errores [*Fault Detection Unit (FD)*] es la comunión entre distintos periféricos de la Tarjeta de Desarrollo Tiva C Series EK-TM4C1294XL. La tarjeta EK-TM4C1294XL recibe las señales de estado (PG) de los LDO además de realizar la conmutación de módulos.

Las Figuras 4.15 y 4.16 ilustra el algoritmo a realizar por la tarjeta de desarrollo como conmutador y unidad de detección de errores; por otro lado la Figura 4.17 muestra el diagrama esquemático simplificado del sistema redundante.

Con el propósito de que el sistema de supervisión sea capaz de mantenerse en operación en caso de que la alimentación de la tarjeta de desarrollo fallara, se cuenta con una batería de respaldo, mostrada en detalle en la Figura 4.18 (circuito de batería de respaldo adaptado de [135]), donde se muestra el diagrama esquemático total a nivel componente.

Para el análisis de la redundancia *fría*, se realizarán las siguientes asunciones:

1. La conmutación entre módulos es *perfecta*
2. Los elementos redundantes son idénticos e independientes
3. La tasa de averías de cada módulo redundante es constante

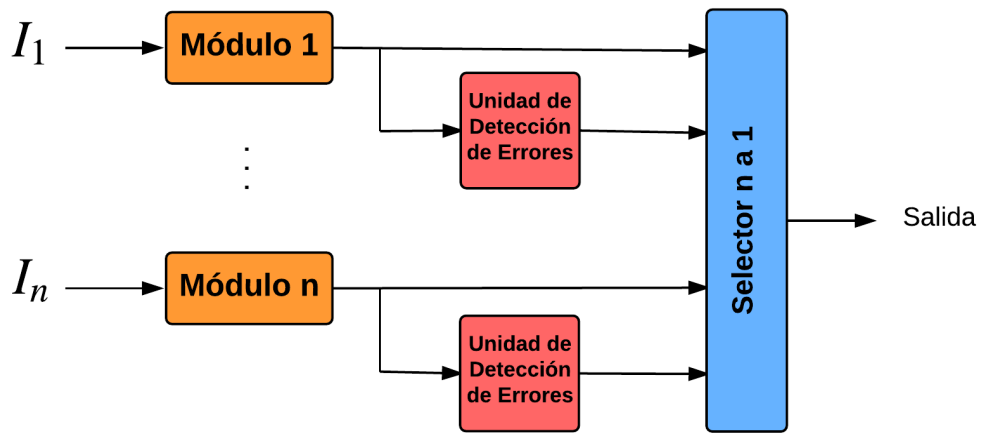


Figura 4.13: Redundancia en espera (repetida) (*standby*). Adaptada de [82]

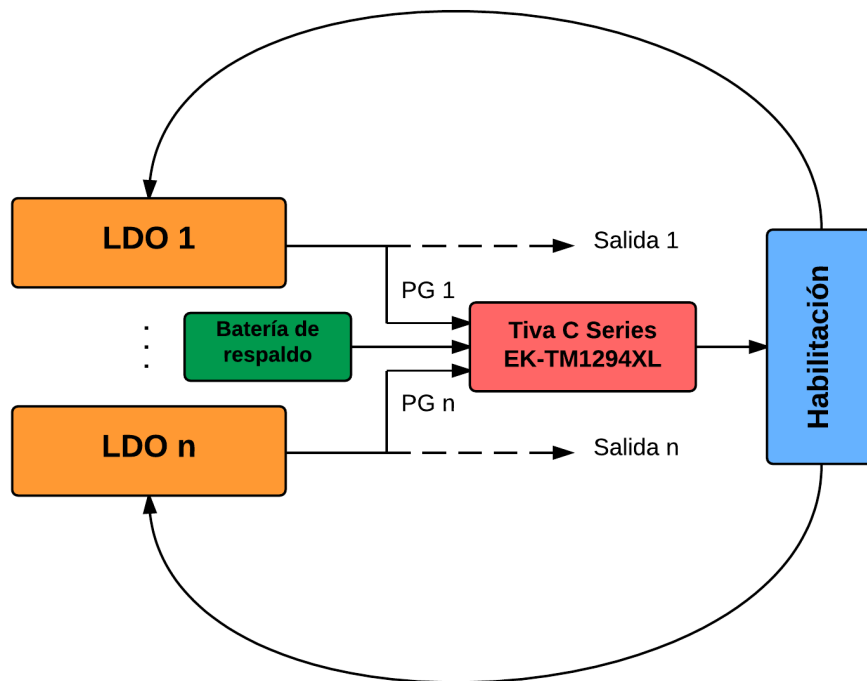


Figura 4.14: Diseño equivalente de redundancia en espera (*standby*)

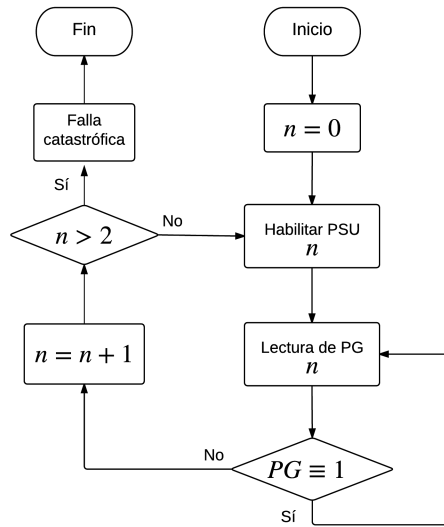


Figura 4.15: Diagrama de flujo de algoritmo de supervisión y selección

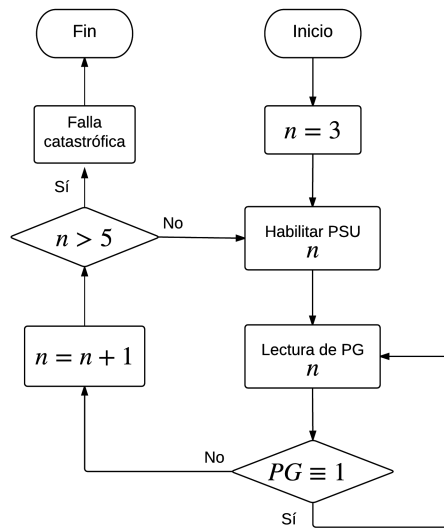


Figura 4.16: Diagrama de flujo de algoritmo de supervisión y selección (2)

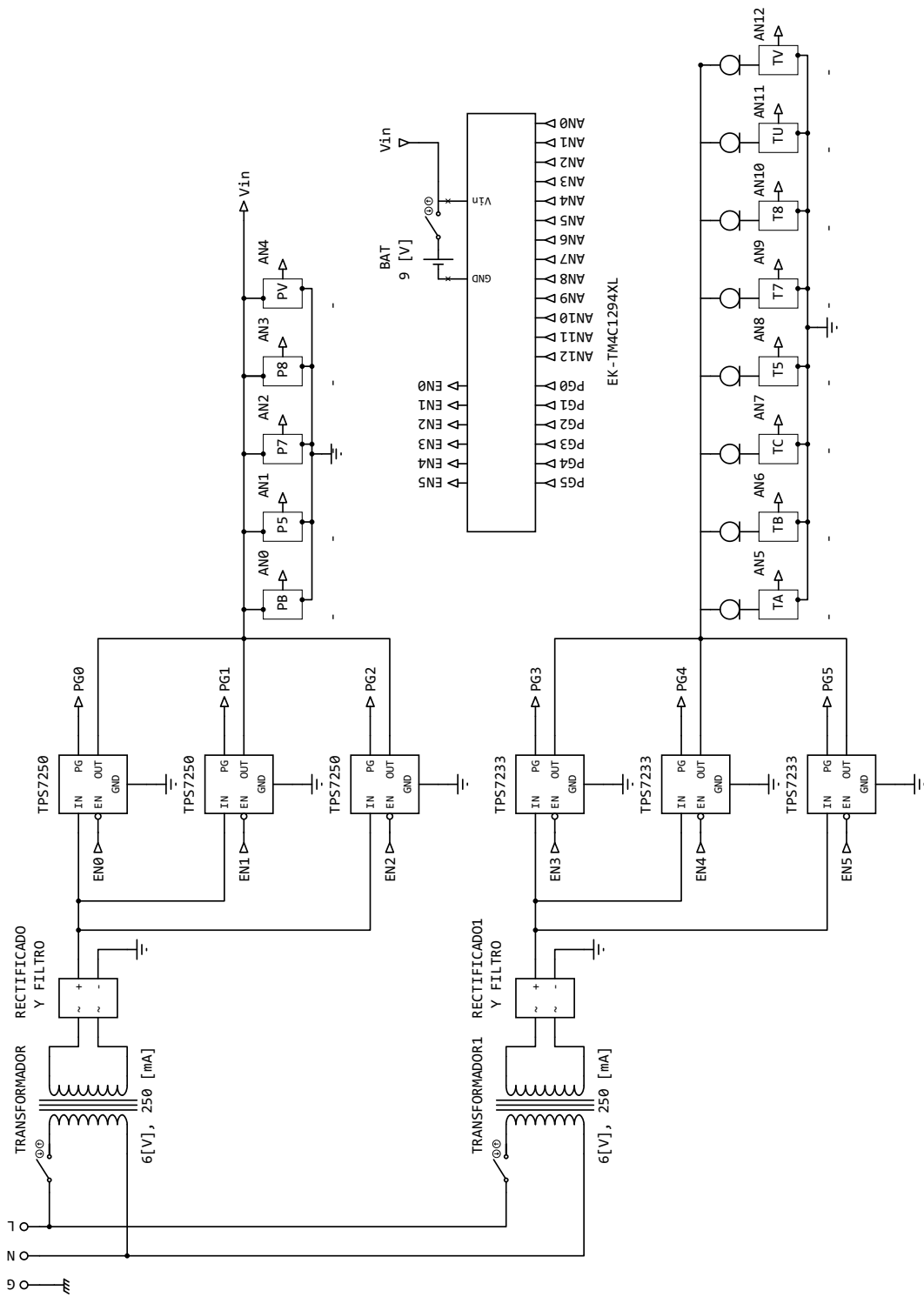


Figura 4.17: Diagrama esquemático simplificado de sistema redundante en espera

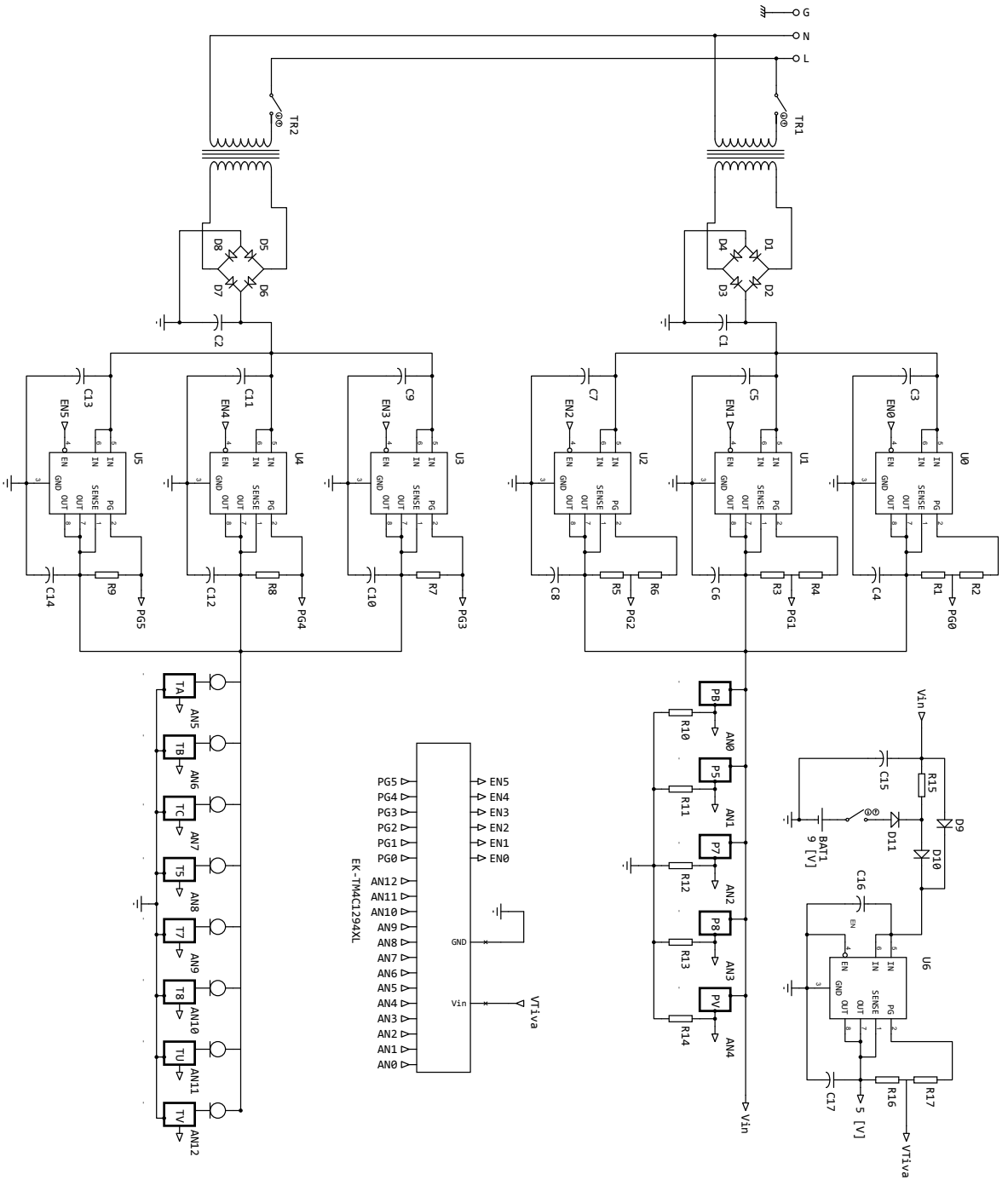


Figura 4.18: Diagrama esquemático de sistema redundante en espera

Tabla 4.10: Estados de diagrama de transición

| Estado | Módulo 1 | Módulo 2 | Módulo 3 | Descripción |
|--------|----------|----------|----------|-----------------------------|
| A | 1 | 1 | 1 | Tres módulos operando |
| B | 1 | 1 | 0 | Dos módulos operando |
| C | 1 | 0 | 0 | Un módulo operando |
| D | 0 | 0 | 0 | Tres módulos no funcionales |

Los procesos de Markov son un caso particular de procesos estocásticos; un proceso estocástico, de manera general, se define como un conjunto de variables aleatorias dependientes del tiempo [136].

La asunción elemental característica en los procesos de Markov es que el sistema posee *estados* independientes, sin *memoria*, es decir, que la transición de un estado a otro no está determinada por un estado anterior o estado presente [82].

Para sistemas redundantes en espera, debido a la dependencia de elementos (un elemento redundante en espera es activado sólo cuando un elemento falla) esta técnica de análisis resulta útil.

La Tabla 4.10 establece los cuatro estados posibles para un sistema redundante en espera con $m = 2$ elementos redundantes, dando un total de 3 módulos de entrada.

El diagrama de bloques de fiabilidad y la cadena de Markov para el sistema redundante final propuesto, se muestra en la Figura 4.19.

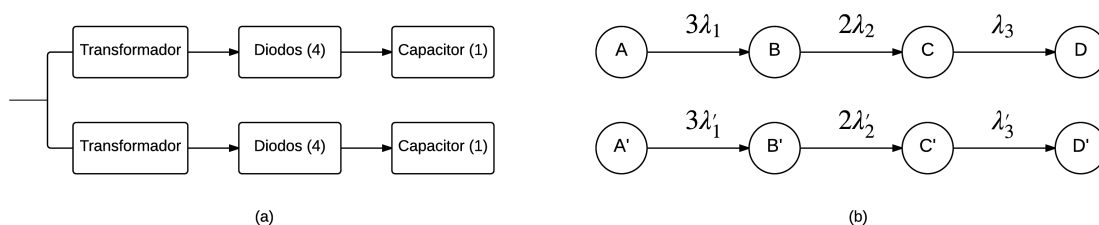


Figura 4.19: (a)Diagrama de bloques (b) Cadena de Markov de sistema redundante en espera

4.20. Fiabilidad de sistema redundante

4.20.1. Fiabilidad de módulos en estados de Markov 1, 2 y 3, independientes

$$R(t) = (R_{capacitor})^2 \cdot (R_{LDO}) \cdot (R_{resistor}) \quad (4.20.1.1)$$

$$R_{1,2,3}(t) = 0.986755 \quad (4.20.1.2)$$

4.20.2. Fiabilidad de cadena de Markov

A partir de la ecuación 3.8.3, para 3 elementos ($m = 2$):

$$R_{std} = \sum_{i=0}^m \frac{(\lambda t)^i e^{-\lambda t}}{i!} \quad (4.20.2.1)$$

$$R_{std} = e^{-\lambda t} + (\lambda t)e^{-\lambda t} + \frac{1}{2}(\lambda t)^2 e^{-\lambda t} \quad (4.20.2.2)$$

Por otro lado:

$$\lambda = \lambda_{1,2,3} = 2\lambda_{capacitor} + \lambda_{LDO} + \lambda_{resistor} \quad (4.20.2.3)$$

$$\lambda = 1.52 \times 10^{-7} \quad (4.20.2.4)$$

Finalmente:

$$R_{std} = 0.999999 \quad (4.20.2.5)$$

4.20.3. Integración parcial

$$R_{parcial}(t) = R_{transformador} \cdot R_{diodos} \cdot R_{capacitor} \cdot R_{std} \quad (4.20.3.1)$$

$$R_{parcial}(t) = 0.952855 \quad (4.20.3.2)$$

4.20.4. Integración final

$$R_{final} = 1 - (1 - 0.952855)^2 = 0.997777 \quad (4.20.4.1)$$

Análisis de resultados

A partir de la metodología desarrollada en el Capítulo 4 se observa que uno de los elementos fundamentales dentro del diseño de sistemas tolerantes a fallas depende de los componentes seleccionados no sólo en calidad sino en características. La justificación de la afirmación anterior es que las fuentes de alimentación seleccionadas cuentan con habilitación externa así como indicador de estado; estas dos características fueron determinantes en la aplicación de la redundancia en frío.

Por otro lado, se resalta el hecho de que en el análisis realizado se descartó a los sensores empleados y se hizo la asunción de que no representan elementos sensibles o susceptibles a fallas dentro de la operación indicada por el fabricante. Lo anterior se sostiene en el hecho de que, a partir de la consulta directa con el fabricante sobre datos de fiabilidad, se obtuvo una serie de documentos detallados en el Apéndice A, donde se presentan las pruebas de calidad realizadas a cada sensor, concluyendo que la fiabilidad esperada para la vida útil de los sensores es mayor que el tiempo de misión requerido.

Un hecho fundamental es que un sistema con fiabilidad alta, implica que realizará su función requerida para el tiempo de vida estimado, por lo que es inherentemente seguro.

Otro elemento relevante es la traslación de un modelo genérico de redundancia fría a componentes reales, que cumplen conceptualmente con el propósito específico requerido.

Por lo anterior, los resultados obtenidos satisfacen la función requerida especificada para una misión de 10 años, con una fiabilidad del 99.77%.

Página intencionalmente en blanco

Conclusiones

- Se cuenta con el diseño de un sistema de instrumentación electrónica tolerante a fallas flexible, modular, replicable y versátil, empleando componentes de grado comercial, con fiabilidad final del 99.77% para un tiempo de operación continuo de diez años
- La aplicación de la técnica de redundancia en espera (*standby*) permite la identificación, localización y aislamiento de fuentes de alimentación anómalas (con falla o avería) mediante una detección concurrente, así como la reconfiguración de elementos de repuesto redundantes
- El sistema de instrumentación propuesto para el CBEI-iiDEA[®] posibilita la eventual expansión en serie de módulos de generación de potencia, haciendo más relevante el desarrollo de sistemas tolerantes a fallas.
- El desarrollo de este sistema establece las bases para la aplicación de sistemas de instrumentación en otros proyectos del Grupo iiDEA[®].

Página intencionalmente en blanco

Trabajo futuro

- Desarrollo físico del sistema de instrumentación electrónica tolerante a fallas
- Reemplazo de sistema de instrumentación actual en el CBEI-iiDEA[®]
- Aplicación de tecnología de Sensores de Auto-Validación (*Self validating sensors*)
- Desarrollo de módulo de supervisión y control de carga de baterías
- Aplicación de un Sistema Operativo en Tiempo Real [*Real-Time Operating System (RTOS)*] en tarjeta de desarrollo
- Integración con sistemas de Control Remoto y Telemetría

Página intencionalmente en blanco

Apéndice A

Datos de fiabilidad

En este apéndice se muestran los datos obtenidos directamente de los fabricantes de los sensores (Honeywell y US Sensors) y semiconductores empleados (Texas Instruments y Central Semiconductors), por otro lado, se muestra la hoja de cálculo generada con los resultados discutidos en el Capítulo 4.

| Elemento | Tasa de averías λ [averías/hora] | Tiempo de misión (t) [horas] | Fiabilidad R(t) |
|--------------------------------------|---|---|--------------------|
| Transformador | 5.00E-07 | 87660 | 0.957116653 |
| Diodo | 2.20E-10 | 87660 | 0.999980715 |
| Capacitor | 5.00E-08 | 87660 | 0.995626591 |
| LDO (3.3, 5) [V] | 2.10E-09 | 87660 | 0.999815931 |
| Resistor | 5.00E-08 | 87660 | 0.995626591 |
| Sistema inicial | | | |
| Rama 1 serie | 0.982364138 | | |
| Rama 2 serie | 0.982364138 | | |
| Rama 1 2 | 0.999688976 | | |
| <u>Fiabilidad integral</u> | <u>0.956818968</u> | | |
| Sistema propuesto | | | |
| | Fiabilidad R(t) | Tasa de averías λ [averías/hora] | |
| Rama 1 serie | 0.986755406 | 1.52E-07 | |
| Rama 2 serie | 0.986755406 | 1.52E-07 | |
| Rama 3 serie | 0.986755406 | 1.52E-07 | |
| Fiabilidad de redundancia en frío | 0.999999609 | <u>Fiabilidad integral</u> | <u>0.99777529</u> |

Figura A.1: Cálculo de fiabilidad

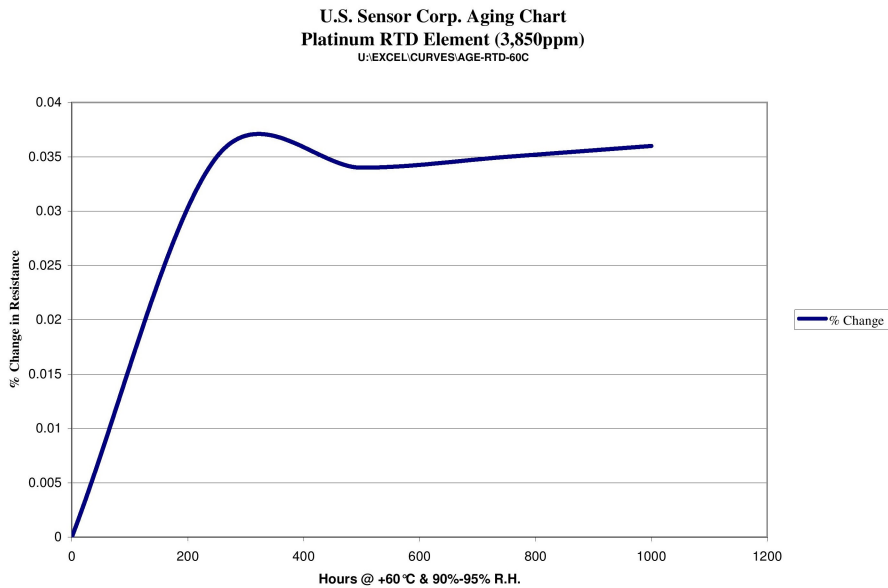


Figura A.2: Variación de resistencia nominal de RTD

**Evaluation Testing - Results Summary
 PX2 Ratiometric Output (AA - AD)**

1 Scope

This test report summarizes the results of evaluation testing performed on PX2 Pressure Sensor listings which are directly related to the Ratiometric Output configuration. All testing was performed by the Honeywell Evaluation Engineering group at Honeywell's Freeport, Illinois, USA, site.

2 Ratiometric Output (AA - AD) Configurations Applicable

| Series | Connector Type | Port Type | Pressure Range (A=Absolute, S=Sealed Gage) |
|--------|--|--|---|
| PX2 | A = Packard Metripak 150 B = Micro M12 IEC 61076-2 C = DIN EN 175301-803C D = Deutsch DTM04-3P E = Cable 1 meter | N1 = NPT 1/4 - 18 N2 = NPT 1/8 - 27 S1 = 9/16-18 UNF SAE J1926-3 S2 = 7/16-20 UNF SAE J1926-3 F1 = 45° Flare (Schrader) SAE J512 M1 = M12 X 1.5 ISO 6149-3 G1 = G1/4 ISO 1179-3 G2= G1/8 ISO 1179-3 | 100P=100 psi 150P=150 psi 010B= 10 bar 001G=1 MPa 200P = 200 psi 250P = 250 psi 016B = 16 bar 1.6 =1.6 MPa 300P = 300 psi 025B = 25 bar 2.5G =2.5 MPa 500P = 500 psi 040B = 40 bar 4.0G=4.0 MPa 600P = 600 psi 667P = 667 psi 046B = 46 bar |

3 Test Summary and Conditions

SAMPLES TESTED:

Three pressure ranges were tested to validate the entire range from 100P to 500P → 100PA, 300PA, 500PA
 All connectors and ports were qualified.
 Some configurations validated by similarity using Current, Regulated electrical outputs.

ACCEPTANCE CRITERIA:

The PX2 Ratiometric Output Pressure Transducer samples must successfully pass all specified criteria as defined in the product specification. All test samples were characterized in an automated characterization test setup prior to and after every test. The general test summary is tabulated in Table C.

Honeywell Confidential

Figura A.3: Pruebas realizadas a sensores de la serie Honeywell PX2

Reliability Test Results

| | | | |
|-----------------------|--|--------|-------------------|
| TESTS | : HTRB LIFE | PERIOD | : ENDING 12/31/07 |
| FAMILY | : Current Limiting Diode, DO35CLD | CASE | : DO-35 |
| PART NUMBERS INCLUDED | : 1N5283 – 1N5314 SERIES, CCL0035 – CCL5750 SERIES, CCLH080 – CCLH150 SERIES | | |
| TEST CONDITIONS | : $T_A=150^{\circ}\text{C}$, $V_T=25\text{V}$ | | |

Statistical Data

| | |
|------------------------------------|---------------------------|
| CONFIDENCE LEVEL | : 60% |
| ACTIVATION ENERGY | : 0.7 eV |
| ACCELERATION FACTOR | : 270 |
| FAILURE RATE AT OPER. TEMP. (55°C) | : 2.30 FITS |
| MTTF | : 4.3×10^8 Hours |

| | |
|-------------|--------------------|
| REPORT DATE | : February 5, 2008 |
| PREPARED BY | : CG |
| APPROVED BY | : JR |

Reliability Engineering Department
Central Semiconductor Corp.

cc-478C

Figura 4.4: Datos estadísticos de pruebas de fiabilidad, Central Semiconductors

Reliability Test Results

TESTS : ENVIRONMENTAL PERIOD : ENDING 12/31/03
 FAMILY : Current Limiting Diode, DO35CLD CASE : DO-35
 PART NUMBERS : 1N5283 – 1N5314 SERIES, CCL0035 – CCL5750 SERIES,
 INCLUDED : CCLH080 – CCLH150 SERIES

| NO. | TEST ITEM | TEST CONDITION | FAILURE RATE |
|-----|---------------------|--|--------------|
| 1 | HIGH TEMP. | $T_A=150^{\circ}\text{C}$, t=1000 HOURS | 0/2400 |
| 2 | LOW TEMP. | $T_A=-65^{\circ}\text{C}$, t=1000 HOURS | 0/2400 |
| 3 | HUMIDITY | $T_A=85^{\circ}\text{C}$, RH=85%, t=1000 HOURS | 0/2400 |
| 4 | TEMPERATURE CYCLING | 150°C/25°C/-55°C 15MIN/<1MIN/15MIN 10 CYCLES | 0/2400 |
| 5 | THERMAL SHOCK | LIQUID TO LIQUID 0°C/100°C 10 CYCLES | 0/2400 |
| 6 | PRESSURE COOKER | $T_A=121^{\circ}\text{C}$, p=15 PSIG t=168 HOURS | 0/2400 |
| 7 | SOLDERABILITY | $T_{(\text{SOLDER})}=245^{\circ}\text{C}$, t=5 SEC | 0/600 |
| 8 | SOLDER DIP | TOTAL IMMERSION, 265°C, 10 SEC | 0/240 |

REPORT DATE : February 5, 2008
 PREPARED BY : CG
 APPROVED BY : JR

Reliability Engineering Department
 Central Semiconductor Corp.

cc-478B

Figura 4.5: Condiciones de pruebas de fiabilidad, Central Semiconductors

Apéndice B

Tablas adicionales

En este apéndice se muestran algunas tablas adicionales relacionadas con pruebas de soporte para fiabilidad de componentes y costos asociados.

Tabla B.1: Requerimientos energéticos de sensores y tarjeta de desarrollo

| Elemento | Tensión [V] | Corriente [A] | Observaciones |
|------------------|----------------------|---------------|---------------------------------|
| PX2EN1XX100PAAAX | 5 | 0.005 | 5 ± 0.15 [V] |
| USW3577 | 3.3 [V] ¹ | 0.00047 | Ninguna |
| EK-TM4C1294XL | 5 | 0.120 | Operación a 120 [MHz] y 80 [°C] |

Tabla B.2: Costo de componentes en configuración sin redundancia (8 de mayo de 2015)

| Número | Dispositivo | Costo unitario (USD) | Costo total (USD) |
|--------|---------------|----------------------|-------------------|
| 1 | TPS7250QP | 1.91 | 1.91 |
| 1 | TPS7233QP | 1.91 | 1.91 |
| 1 | EK-TM4C1294XL | 19.99 | 19.99 |
| 8 | 1N5290 | 7.54 | 60.32 |
| | | Total | 84.13 |

Tabla B.3: Costo de componentes con redundancia en frío (8 de mayo de 2015)

| Número | Dispositivo | Costo unitario (USD) | Costo total (USD) |
|--------|---------------|----------------------|-------------------|
| 3 | TPS7250QP | 1.91 | 5.73 |
| 3 | TPS7233QP | 1.91 | 5.73 |
| 1 | EK-TM4C1294XL | 19.99 | 19.99 |
| 8 | 1N5290 | 7.54 | 60.32 |
| | | Total | 91.77 |

Tabla B.4: Comparación de costo asociado a sistemas

| Sistema | Fiabilidad | Costo (USD) | Incremento |
|---------------------------|------------|-------------|------------|
| Sin redundancia | 95.68 | 84.13 | - |
| Con redundancia en espera | 99.77 | 91.77 | 9.08% |

| Componente | ELFR | Datos de soporte para ELFR | | | |
|-----------------|-----------|----------------------------|----------------------------|--------------------|------------------|
| | ELFR-DPPM | Nivel de confianza [%] | Temperatura de prueba [°C] | Número de muestras | Número de fallas |
| TPS7233QP | 162 | 60 | 125 | 12490 | 1 |
| TPS7250QP | 162 | 60 | 125 | 12490 | 1 |
| TM4C1294NCPDTT3 | - | - | - | - | - |

Tabla B.5: Datos de soporte para ELFR, Texas Instruments

| Componente | MTBF / FIT | | Datos de soporte para MTBF / FIT | | | | | |
|-----------------|----------------|------|----------------------------------|----------------------------|----------------------------|------------------------|--------------------|------------------|
| | MTBF | FIT | Nivel de confianza [%] | Energía de activación [eV] | Temperatura de prueba [°C] | Duración de prueba [h] | Número de muestras | Número de fallas |
| TPS7233QP | $4.85 * 10^8$ | 2.1 | 60 | 0.7 | 125 | 1000 | 12490 | 1 |
| TPS7250QP | $4.85 * 10^8$ | 2.1 | 60 | 0.7 | 125 | 1000 | 12490 | 1 |
| TM4C1294NCPDTT3 | $4.153 * 10^8$ | 2.41 | 60 | 0.7 | 125 | 1000 | 4890 | 0 |

Tabla B.6: Datos de soporte para MTBF, Texas Instruments

Apéndice C

Notas finales

Parte del Capítulo 4 de esta tesis fue presentada bajo el título “*Fault-tolerance Instrumentation System for Flash Evaporation Binary Cycle*” en el Séptimo Congreso Internacional *Power Plays: Geothermal Energy in Oil and Gas Fields*, convocado por el *Geothermal Lab* de la Universidad Metodista del Sur (*Southern Methodist University (SMU)*), en la ciudad de Dallas, Texas, Estados Unidos, el 19 de mayo de 2015.

Información referente a este evento puede encontrarse en las siguientes direcciones:

SMU Geothermal Lab

<http://smu.edu/geothermal>

Power Plays: Geothermal Energy in Oil and Gas Fields

<http://www.smu.edu/Dedman/Academics/Programs/GeothermalLab/Conference>

2015 Presenters

<http://www.smu.edu/Dedman/Academics/Programs/GeothermalLab/Conference/2015Presenters>

Página intencionalmente en blanco

Bibliografía

- [1] British Petroleum, ed., *BP Statistical Review of World Energy*, June 2014.
- [2] Sistema de Información Energética, “Capacidad efectiva por tecnología”, Secretaría de Energía, Reporte, 2015.
- [3] Subsecretaría de Electricidad, “Sector Eléctrico Nacional: Generación Bruta de Energía Eléctrica”, Secretaría de Energía, Reporte, 2015.
- [4] —, “Sector Eléctrico Nacional: Consumo de Combustibles”, Secretaría de Energía, Reporte, 2014.
- [5] International Energy Agency, ed., *World Energy Outlook 2013 Factsheet*, 2014.
- [6] Secretaría de Energía, *Centros Mexicanos de Innovación en Energía*, 2013.
- [7] Centro Mexicano para la Innovación en Energía Geotérmica. (2014). CeMIE-Geo: Quiénes somos, dirección: <http://www.cemiegeo.org/doarsal.php?doarsal=c&q=12> (visitado 18-03-2015).
- [8] Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, Diario Oficial de la Federación, *Ley para el Aprovechamiento de energías renovables y el financiamiento de la transición energética*, 2013.
- [9] Centro Mexicano para la Innovación en Energía Geotérmica. (2014). CeMIE-Geo: Instituciones participantes, dirección: <http://www.cemiegeo.org/doarsal.php?doarsal=csub&q=12&s=41> (visitado 18-03-2015).
- [10] Secretaría de Energía, *Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica: CeMIE-Geo*, 2014.
- [11] Centro Mexicano para la Innovación en Energía Geotérmica. (2014). CeMIE-Geo: Laboratorios, dirección: <http://www.cemiegeo.org/doarsal.php?doarsal=c&q=14> (visitado 18-03-2015).
- [12] Secretaría de Energía, ed., *Initiative for the development of geothermal energy in Mexico*, Marzo 2013.
- [13] C. McGinn, *Basic Structures Of Reality: Essays in Meta-Physics*. Oxford University Press, 2012.
- [14] N. Nisson y Alex Wilson, “Renewable Energy and other Alternative Energy Sources”, en *The Virginia Energy Savers Handbook: A guide to Saving Energy, Money and the Environment*, Virginia Department of Mines Minerals and Energy, ed., 2008.
- [15] I. Stober y K. Bucher, *Geothermal Energy: From Theoretical Models to Exploration and Development*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013.

- [16] O. Edenhofer, “Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation”, Intergovernmental Panel on Climate Change, Report, 2012.
- [17] “Renewables 2014: Global status report”, REN 21. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, Report, 2014.
- [18] J. Eibenschutz, *Energy, Present and Future*, en *Towards a Cleaner Planet*, J. Klapp y J. F. C. Alcalá, eds., 2007.
- [19] C. J. Cleveland y C. Morris, “Geothermal”, en *Handbook of Energy*, 2 vols. 2014.
- [20] W. Suckow, *Geothermal Energy Uses*, 2005, Geothermal Education Office.
- [21] I. Stober y K. Bucher, *Geothermal Energy: From Theoretical Models to Exploration and Development*. Springer, 2013.
- [22] K. Gibbs. (2015). The Internal Structure of the Earth, dirección: http://www.schoolphysics.co.uk/age14-16/General/text/Earth's_internal_structure/index.html (visitado 15-04-2015).
- [23] LXRICHTER. (2013). Historical note on the first geothermal plant in Mexico 1959, dirección: <http://gre.thinkgeoenergy.com/archives/14724> (visitado 15-04-2015).
- [24] M. H. Dickson y M. Fanelli, “What is Geothermal Energy?”, Istituto di Geoscienze e Georisorse, CNR, Report, 2004.
- [25] L. Rybach, “Classification of geothermal resources by potential”, *Geothermal Energy Science*, 2015.
- [26] H. Gupta y S. Roy, *Geothermal Energy: An Alternative Resource for the 21 Century*. Elsevier, 2006.
- [27] W. A. Duffield y J. H. Sass, Geothermal energy - clean power from the Earth's heat, en *U.S. Geological Survey Circular 1249*. 2003.
- [28] Geothermal Energy Association, *Geothermal basics: Q&A*, 2012.
- [29] B. Lunis, “Geopressured-Geothermal Direct Use Potentials are Significant”, *GHC Bulletin*, 1990.
- [30] J. Twidell y T. Weir, *Renewable Energy Resources*. Taylor & Francis, 1986.
- [31] L. McLarty, P. Grabowski, D. Etingh y A. Robertson-Tait, “Enhanced geothermal systems R&D in the United States”, en *Proceedings of the World Geothermal Congress*, editor, ed., 2000.
- [32] B. Matek, “2014 Annual U.S. & Global Geothermal Power Production Report”, Geothermal Energy Association, Report, 2014.
- [33] D. Blackwell, M. Richards, Z. Frone, J. Batir, A. Ruzo, R. Dingwall y M. Williams, “Temperature at depth maps for the conterminous US and geothermal resource estimates”, *Geothermal Resources Council Transactions*, 35, 1545-1550. *GRC Record 1029452.*, 2011.
- [34] P. Muffler y R. Cataldi, “Methods for regional assessment of geothermal resources”, *Geothermics*, vol. 7, 1978.
- [35] M. P. Hochstein, “Classification and assessment of geothermal resources,” Small geothermal resources, UNITAR/UNDP Centre for Small Energy Resources, Report, 1990.

- [36] G. C. Benderitter, "Possible approach to geothermal research and relative cost estimate", Small Geothermal Resources, UNITAR/UNDP Centre for Small Energy Resources, Report, 1990.
- [37] R. Haenel, L. Rybach y L. Stegena, "Fundamentals of geothermics", en *Handbook of Terrestrial Heat-Flow Density Determination*. 1988.
- [38] Asociación Geotérmica Mexicana. (2015). Recursos geotérmicos en México, dirección: http://www.geotermia.org.mx/geotermia/?page_id=688 (visitado 18-04-2015).
- [39] GreenPower, *Mexican International Renewable Energy Congress - Infographics*.
- [40] United Nations, *Demographic Year Book*. 2010.
- [41] Worldometers. (2015). Current world population, dirección: <http://www.worldometers.info/world-population/> (visitado 15-04-2015).
- [42] United Nations Development Programme. (2015). Human Development Index Trends (1980-2013), dirección: <http://hdr.undp.org/en/content/table-2-human-development-index-trends-1980-2013> (visitado 15-04-2015).
- [43] B. Matek y K. Gawell, "The Economical Costs and Benefits of Geothermal Power", Geothermal Energy Association, Report, 2014.
- [44] A. Holm, D. Jennejohn y L. Blodgett, "Geothermal Energy and Greenhouse Gas Emissions", Geothermal Energy Association, Report, 2012.
- [45] B. Lunis y R. Brekenridge, "Geothermal Direct Use, Engineering and Design handbook", *Geo-Heat Center*, 1991.
- [46] A. Kagel, D. Bates y K. Gawell, "A Guide to Geothermal Energy and the Environment", Geothermal Energy Association, Report, 2007.
- [47] L. Vimmerstedt, "Opportunities for Small Geothermal Projects: Rural Power for Latin America, the Caribbean, and the Philippines", National Renewable Energy Laboratory, Report, 1998.
- [48] D. J. Entingh, E. Easwaran y L. McLarty, Small Geothermal Electric Systems for Remote Power, en *Geothermal Resources Council Transactions, Vol. 18*. 1994.
- [49] J. W. Pritchett, "Electrical Generating Capacities of Geothermal Slim Holes", Federal Geothermal Resarch Program Update, Prepared for the U.S. Department of Energy, Report, 1997.
- [50] J. W. Lund y T. Boyd, "Small Geothermal Power Project Examples", *GHC Bulletin*, 1999.
- [51] M. Martín-Gamboa, D. Iribarren y J. Dufour, "On the environmental suitability of high- and low-enthalpy geothermal systems", *Geothermics*, 2014.
- [52] F. Kreith y D. Y. Goswami, *Handbook of Energy Efficiency and Renewable Energy*. CRC Press, 2007.
- [53] P. Birkle, "Development of geothermal energy in Mexico and its energetic potential for the future", en *Towards a Cleaner Planet*. 2007.
- [54] H. M. Sadiq J. Zarrouk, "Efficiency of geothermal power plants: A worldwide review", *Geothermics*, 2014.
- [55] M. Richards, ed., *Finding Geothermal Energy in Texas*, 2008.

- [56] P. Valdimarsson, *Geothermal Power Plant Cycles and Main Components*, en *Short course on Geothermal Drilling, Resource Development and Power Plants*. 2011.
- [57] K. Sierra Doroteo, “Diseño y construcción de un separador de flujos para un ciclo de generación geotermoeléctrica”, Grupo iiDEA, Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, 2014.
- [58] R. DiPippo, *Geothermal Power Plants: Principles, Applications, Case Studies and Environmental Impact*, Third Edition. Elsevier, 2012.
- [59] U.S. Department of Energy. (2015). Hydrothermal Power Systems, dirección: {<http://libertyparkusafd.org/lp/BuildingGreenUSA/Geothermal%20Power/Hydrothermal%20Power%20Systems.htm>} (visitado 18-04-2015).
- [60] H. M. Aviña Jiménez, *Tipos de centrales geotermoeléctricas convencionales*, 2013.
- [61] Mitracó. (2015). Geothermal Techniques: Indirect use, power generation, dirección: <http://mitracó-surya.com/contents/geothermal/techniques/indirect-use-%E2%80%93-power-generation/> (visitado 18-04-2015).
- [62] L. A. Herrera Bonilla, “Análisis y evaluación de dispositivos de estrangulamiento para la evaporación instantánea en un ciclo de generación geotermoeléctrica”, Grupo iiDEA, Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, 2015.
- [63] H. M. Aviña Jiménez, G. León de los Santos y G. A. Durán González, “Comparativa de Rendimiento Energético entre un Ciclo Binario y uno Modificado, con Geotermia de Baja Entalpía”, en *Memorias del XIX Congreso Internacional Anual de la SOMIM*, Sociedad Mexicana de Ingenieros Mecánicos, ed., 2013.
- [64] E. F. Rodríguez Zárate, “Propuesta de diseño de un intercambiador de calor de placas para el ciclo pwg”, Grupo iiDEA, Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, 2013.
- [65] V.E. Zenón Arroyo, “Propuesta de diseño mecánico de la turbina del ciclo pwg analizado por el método de elemento finito”, Grupo iiDEA, Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, 2013.
- [66] J. Hernández García, “Diseño del rotor de una turbina de altas revoluciones acoplada a un ciclo de generación eléctrica”, Grupo iiDEA, Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, 2012.
- [67] O. I. E. Ramos Campos, “Diseño del estator de una turbina de altas revoluciones acoplada a un ciclo de generación eléctrica”, Grupo iiDEA, Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, 2012.
- [68] D. García García, “Análisis del acoplamiento de los elementos del ciclo cbei”, Grupo iiDEA, Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, 2015.
- [69] J. Strutt y D. Bowden, *Reliability Engineering and Risk Management Overview*, en *Risk and Reliability Management*, C. U. School of Water Sciences, ed., 1999.
- [70] J. Strutt, *Human Reliability and Accident Causation*, en *Year 2000 Module in Safety Risk and Reliability Engineering*, School of Industrial and Manufacturing Science, Cranfield University, ed., 2000.

- [71] Canadian Centre for Occupational Health and Safety. (2009). OSH Answer Fact Sheets: Hazard and Risk, dirección: http://www.ccohs.ca/oshanswers/hsprogram/hazard_risk.html (visitado 12-04-2015).
- [72] Royal Society of Great Britain, *Risk assessment*, United Kingdom, 1983.
- [73] A. Avižienis, J. C. Laprie y B. Randell, "Fundamental concepts of Dependability", University of California, Los Angeles, Computer Science, Report.
- [74] D. Gibson. (2011). Understanding The Security Triad (Confidentiality, Integrity, and Availability), dirección: <http://www.pearsonitcertification.com/articles/article.aspx?p=1708668> (visitado 18-04-2015).
- [75] International Standards Organization, *ISO 9000-2005: Quality Management Systems - Fundamentals and Vocabulary*, 2005.
- [76] Alessandro Birolini, *Reliability Engineering: Theory and Practice*, Seventh Edition, Springer, ed. 2014.
- [77] K. B. Misra, ed., *Handbook of Performability Engineering*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.
- [78] A. K. Verma, S. Ajit y D. R. Karanki, *Reliability and Safety Engineering*, Springer, ed. 2010.
- [79] J. Gray and A. Reuter, *Transaction Processing: Concepts and Techniques*, M. K. Publishers, ed. 1992.
- [80] R. F. Stapelberg, *Handbook of Reliability, Availability, Maintainability and Safety in Engineering Design*, Springer-Verlag London Limited, ed. 2009.
- [81] A. Avižienis, "Basic Concepts and Taxonomy of Dependable and Secure Computing", *Transactions on Dependable and Secure Computing*, vol. 1, n.º 1, 2004.
- [82] E. Dubrova, *Fault-Tolerant Design*, Springer, ed. 2013.
- [83] M. Lazzaroni, L. Cristaldi, L. Peretto, P. Rinaldi y M. Catelani, *Reliability Engineering: Basic Concepts and Applications in ICT*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, ed. 2011.
- [84] United Kingdom Atomic Energy Safety and Reliability Directorate, ed., *A study of common-mode failures*, 1979.
- [85] R. E. Barlow, System Reliability, en *Engineering Reliability*, vol. ASA-SIAM Series on Statistics and Applied Probability, 1998.
- [86] Alion Science and Technology - System Reliability Center, *Calculating Failure Rates of Series/Parallel Networks*, 2006.
- [87] B. Johnson, "Fault-tolerant microprocessor-based systems", *IEEE Micro*, 4.^a ép., vol. 6, n.º 6-21, 1984.
- [88] M. Abd-El-Barr, *Reliable and Fault Tolerant*, Imperial College Press, ed. London, 2007.
- [89] H. Ascher y H. Feingold, *Repairable Systems Reliability: Modeling, Inference, Misconceptions and Their Causes*. New York: Marcel Dekker, 1984.
- [90] D. Trindade y S. Nathan. (2015). "Failure Rate", which one?, Stat-Tech, dirección: http://www.trindade.com/ISMI_FailureRate_92005.pdf (visitado 12-04-2015).
- [91] M. Finkelstein, *Failure Rate Modelling for Reliability and Risk*, Springer, ed. 2008.

- [92] A. Kumar, *Failure Rate (Updated and Adapted from Notes by Dr. A. K. Nema)*, 2014.
- [93] Texas Instruments Incorporated. (2015). Reliability Data: Reliability Estimator, dirección: <http://focus.ti.com/quality/docs/partnumsearch.tsp?templateId=5909&navigationId=11213&mtbfType=true> (visitado 12-04-2015).
- [94] National Institute of Standards and Technology. (2015). Repair rate or ROCOF, dirección: <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/apr/section1/apr125.htm> (visitado 18-04-2015).
- [95] W. J. Vigrass. (2015). Calculation of Semiconductor Failure Rates, Intersil, dirección: http://www.intersil.com/content/dam/Intersil/quality/rel/calculation_of_semiconductor_failure_rates.pdf (visitado 12-04-2015).
- [96] Vishay Semiconductors, *Reliability*, 2015. dirección: <http://www.vishay.com/docs/80099/reliabil.pdf> (visitado 15-04-2015).
- [97] COOPER Crouse-Hinds, *Availability, Reliability, SIL: What's the difference?*, 2010.
- [98] J. Strutt, *Introduction to Reliability Engineering and Risk Management*, en *Year 2000 Module in Safety Risk and Reliability Engineering*, School of Industrial and Manufacturing Science, Cranfield University, ed., 2000.
- [99] T. Nakagawa, *Advanced Reliability Models and Maintenance Policies*, Springer, ed. 2008.
- [100] H. Noura, *Fault-tolerant Control Systems: Design and Practical Applications*, Springer, ed. 2009.
- [101] M. McElholm, J. Harkin, L. McDaid y S. Carrillo, "Bio-Inspired Online Fault Detection in NoC Interconnect", en *Energy-Efficient Fault-Tolerant Systems*. Springer, 2014.
- [102] J. Strutt, *System reliability analysis*, en *Risk and Reliability Management*, C. U. School of Water sciences, ed., 1999.
- [103] R. A. Center, ed., *Understanding Series and Parallel Systems Reliability*, 11 vols., 5.
- [104] B. S. Dhillon, *Applied Reliability and Quality*. London: Springer-Verlag, 2007.
- [105] Cluster of European Research Projects on the Internet of Things, CERP-IoT, *Vision and challenges for realizing the internet of things*, 2010.
- [106] J. Gubbi, R. Buyya, S. Marusic y M. Palaniswami, "Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions", *Future Generation Computer Systems*, 2013.
- [107] R. H. Weber, "Internet of things - New security and privacy challenges", *Computer Law & Security Review*, 2010.
- [108] D. Miorandi, S. Sicari, F.D. Pellegrini e I. Chlamtac, "Internet of Things: Vision, applications, challenges", *Computer Law & Security Review*, 2010.
- [109] J. Strutt, *Failure Modes and Effects Criticality Analysis (FMECA)*, en *Risk and Reliability Management*, C. U. School of Water sciences, ed., 1999.
- [110] T. P. Omdahl, ed., *Reliability, Availability, and Maintainability (RAM) Dictionary*, Milwaukee, Wisconsin: American Society for Quality Control (ASQC) Press, 1988.
- [111] Bureau of Naval Weapons, Department of the Navy, *General Specification for Design, Installation, and Test of Air Flight Control Systems*, Washington, D.C., 1955.

- [112] W. Jordan, ed., *Failure modes, effects and criticality analyses*, roceedings of the annual reliability y maintainability symposium, 1972.
- [113] B. S. Dhillon, *Human Reliability, Error, and Human Factors in Power Generation*. Switzerland: Springer, 2014.
- [114] W. Grant Ireson, C. Coombs y R. Moss, eds., *Handbook of Reliability Engineering and Management*, New York: McGraw Hill Book Company, 1996.
- [115] T. T. Moss y J. D. Andrews, eds., *Reliability assessment of mechanical systems*, 210 vols., Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 1996.
- [116] WeatherSpark. (2015). Average Weather for Mexico City (1990 - 2012), dirección: <https://weatherspark.com/averages/32574/Mexico-City-Distrito-Federal> (visitado 12-04-2015).
- [117] J. F. Prada, *The value of Reliability Power Systems*, Energy Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, 1999.
- [118] M. R. Neuman. (2015). Basic instrumentation systems, dirección: <http://www.biomed.mtu.edu/~osoykan/classes/be3600/note2003/basicins.pdf> (visitado 15-04-2015).
- [119] S. Tumanski, *Principles of Electrical Measurement*. Taylor & Francis, 2006.
- [120] R. J. Hansman, “Characteristics of instrumentation”, en *The Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook*. CRC Press, 1999.
- [121] John Fluke Manufacturing Company, *Metrology solutions*, 1991.
- [122] R. Dasgupta, D. Chattopadhyay, A. Pal y T. Chakravarty, “A Comprehensive Seven Layer Sensor Model: Cyber-Physical System”, en *Sensing Technology: Current Status and Future Trends I*, A. Mason, S. C. Mukhopadhyay y K. P. Jayasundera, eds., 7 vols., 2014.
- [123] R. Palás-Areny, “Amplifiers and signal conditioners”, en *The Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook*. CRC Press, 1999.
- [124] WIKA Instrument Corporation, *Wika - Handbook: Pressure and Temperature Measurement*, 1998.
- [125] Honeywell International, *Honeywell to Showcase Newest Sensors at Sensor + Test 2013: Models with small size, rugged design, and accuracy help optimize test and measurement applications*, 13 de mayo, 2013.
- [126] E. Walker, *Design review: A step-by-step Approach to AC line-powered converters*, Texas Instruments, 2005.
- [127] C. Simpson, *Linear and Switching Voltage Regulator Fundamentals*, National Semiconductor, 2011.
- [128] Texas Instruments, *Digital Designers Guide to Linear Voltage Regulators and Thermal Management*, 2003.
- [129] B. C. Baker, *Precision Temperature-Sensing With RTD Circuits*, Microchip Technology Inc. 2003.
- [130] R. T. Paynter, *Introductory Electronics Devices and Circuits*, Seventh Edition, Pearson Prentice Hall, ed. 2006.
- [131] P. O'Connor, *Practical reliability engineering*. Chichester, U.K.: John Wiley & Sons, 1985.

- [132] D. R. Loughmiller, *Quality and Reliability of Quality and Reliability of Semiconductor Devices Semiconductor Devices*, Micron Technology, Inc., 2015. dirección: <http://www.ee.uidaho.edu/ee/classes/ee481f01/Micronrelib.pdf> (visitado 12-04-2015).
- [133] G. W. A. Dummer, *An Elementary Guide to Reliability*. Butterworth-Heinemann, 1997.
- [134] Mitsubishi High Power Semiconductors, *Semiconductor Device Reliability*, 1998. dirección: <http://www.mitsubishielectric.com/semiconductors/files/manuals/reliability.pdf> (visitado 15-04-2015).
- [135] M. Jethwani. (2015). Arduino Mains Failure Battery Backup Circuit, dirección: <http://www.instructables.com/id/Arduino-Mains-Failure-Battery-Backup-Circuit/> (visitado 15-04-2015).
- [136] M. Kozdron, *The Definition of a Stochastic Process*, 2006.