

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

DISEÑO DE UN SISTEMA DE SUPERVISIÓN Y CONTROL DE UN TRANSMISOR A MAGNETRÓN PARA UN RADAR METEOROLÓGICO DEL INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA (INAMEH).

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
por el bachiller Daniel Matas Díaz,
para optar por el Título
de Ingeniero Electricista

Caracas, 2013

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

DISEÑO DE UN SISTEMA DE SUPERVISIÓN Y CONTROL DE UN TRANSMISOR A MAGNETRÓN PARA UN RADAR METEOROLÓGICO DEL INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA (INAMEH).

Profesor Guía: Dr. Simón Morales

Tutor Industrial: Ing. Iñaki Iza

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
por el bachiller Daniel Matas Díaz,
para optar por el Título
de Ingeniero Electricista

Caracas, 2013

CONSTANCIA DE APROBACIÓN

Caracas, 30 de octubre de 2013

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Eléctrica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el bachiller Daniel Matas Díaz, titulado:

**“DISEÑO DE UN SISTEMA DE SUPERVISIÓN Y CONTROL DE
UN TRANSMISOR A MAGNETRÓN PARA UN RADAR
METEOROLÓGICO DEL INSTITUTO NACIONAL DE
METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA (INAMEH)”.**


Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudio conducente al título de Ingeniero Electricista en la mención de Electrónica, y sin que esto signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO.


Prof. Alejandro González

Jurado


Prof. José Romero

Jurado


Prof. Simón Morales

Profesor Guía

DEDICATORIA

A mis papas, mis hermanos y a Cris.

RECONOCIMIENTOS Y AGRADECIMIENTOS

Primero agradecerle a la Universidad Central de Venezuela por permitirme formarme entre sus salones y jardines, es la experiencia más grande que puede aspirar un estudiante.

A mi familia y mi novia por todo el apoyo y paciencia que me tuvieron en este proceso y la ayuda incondicional en todo momento.

Al Ingeniero Iñaki Iza por toda la ayuda, paciencia, asesoría y su contribución a lo largo del desarrollo de este trabajo.

Al profesor Simón Morales por todos los buenos consejos y asesoría a lo largo del desarrollo de la tesis.

Al personal del laboratorio de radares del INAMEH por todo su tiempo y ayuda en el trabajo de grado.

A todos los grandísimos profesores que tuve a lo largo de mis estudios en la facultad, que ayudaron y dieron consejos en cada paso de la carrera.

A mis amigos cubanos que ayudaron tanto con sus conocimientos en el desarrollo del trabajo.

Matas D., Daniel

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE SUPERVISIÓN Y CONTROL DE
UN TRANSMISOR A MAGNETRÓN PARA UN RADAR
METEOROLÓGICO DEL INSTITUTO NACIONAL DE
METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA (INAMEH).**

Tutor Académico: Simón Morales. Tutor Industrial: Ing. Iñaki Iza. Tesis. Caracas. U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Eléctrica. Ingeniero Electricista. Opción: Electrónica y control. Institución: INAMEH. 2013.

Palabras Claves: SCADA; Transmisor de radar; Magnetron; Radar; Qt Creator; C++; QML.

Resumen. Se plantea el diseño de un SCADA de un transmisor de radar que utiliza un magnetron como fuente de RF en alta potencia, estudiando su factibilidad y desarrollando el sistema de supervisión y control con una interfaz hombre-máquina capaz de informar al técnico del radar de eventos y alarmas en tiempo real, además almacenando la información para su posterior análisis. El trabajo plantea como objetivo general el diseño del SCADA para un transmisor de radar, esto llevándose a cabo con la selección de los diferentes equipos necesarios en el transmisor, del protocolo de comunicaciones, del controlador y los programas de desarrollo del sistema de supervisión y control, luego se programa el SCADA en los lenguajes C++ y QML utilizando Qt Creator como plataforma de desarrollo y se simuló con una serie de casos típicos que pueden existir en el encendido y operación del transmisor de radar, finalmente se propone la integración del sistema de supervisión y control del transmisor. Los objetivos planteados se cumplieron y se concluye que el SCADA diseñado cumple con las necesidades de control y supervisión del transmisor a magnetron ya que es capaz de detectar cualquier falla en el proceso de encendido y operación del transmisor por esto fue aprobado por el personal técnico del INAMEH.

ÍNDICE GENERAL

CONSTANCIA DE APROBACIÓN	iii
DEDICATORIA	iv
RECONOCIMIENTOS Y AGRADECIMIENTOS	v
RESUMEN	vi
ÍNDICE GENERAL	vii
LISTA DE TABLAS	ix
LISTA DE FIGURAS	xi
SIGLAS	xii
ACRÓNIMOS	xiv
INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO I	3
1. GENERALIDADES	3
1.1. Planteamiento del Problema.....	3
1.2. Factibilidad del cambio de tecnología.....	4
1.3. Objetivo General	8
1.4. Alcances	9
CAPÍTULO II	10
2. MARCO TEÓRICO.....	10
2.1. Sistema de Radar.....	10
2.2. Klystron.....	11
2.3. Transmisor con klystron.....	15
2.4. Magnetron	20
2.5. Magnetron coaxial.....	21
2.6. Transmisor con magnetron.....	24
2.7. Sistema SCADA	26
CAPITULO III	32
3. METODOLOGÍA	32

CAPITULO IV	34
4. PROPUESTA DE DISEÑO DEL SISTEMA DE SUPERVISIÓN Y CONTROL	34
4.1. Desarrollo del diseño	34
CAPITULO V	63
5. RESULTADOS.....	63
5.1. Simulación	63
5.2. Propuesta de integración al sistema de radar	76
CONCLUSIONES	77
RECOMENDACIONES	79
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	80
ANEXOS	81

LISTA DE TABLAS

Tabla N° 1: Comparación de los valores básicos de operación.	4
Tabla N° 2.: Comparación cantidad de equipos y componentes.....	5
Tabla N° 3.: Comparación económica.	7
Tabla N° 4.: Señales de control de un transmisor a magnetrón en su etapa de preparación..	37
Tabla N° 5.: Señales de control de un transmisor a magnetrón en su etapa de precalentamiento.	38
Tabla N° 6.: Señales de control de un transmisor a magnetrón en su etapa de radiación.	39
Tabla N° 7.: Comandos de control de un transmisor a magnetrón.	40
Tabla N° 8.: Paso 01, etapa de preparación, señales del gabinete.	42
Tabla N° 9.: Paso 02, etapa de preparación, señales de fusibles.....	43
Tabla N° 10.: Paso 03, etapa de preparación, señales de ventiladores.....	44
Tabla N° 12.: Paso 05, etapa de precalentamiento, reseteo de seguridad.	45
Tabla N° 13.: Paso 06, etapa de precalentamiento, reseteo de seguridad	45
Tabla N° 14.: Paso 07, etapa de precalentamiento, señales de la fuente de filamentos.	46
Tabla N° 15.: Paso 08, etapa de precalentamiento, inicio de temporizador de precalentamiento.	46
Tabla N° 16.: Paso 09, etapa de precalentamiento, señales de presurización de guía de ondas.	47
Tabla N° 17.: Paso 10, etapa de precalentamiento, señales de la MPS.....	47
Tabla N° 18.: Paso 11, etapa de precalentamiento, apagado del temporizador de precalentamiento.	48
Tabla N° 19.: Paso 12, etapa de precalentamiento, señal de fuente de alimentación de TTU.	48
Tabla N° 20.: Paso 13, etapa de precalentamiento, señales de estado del aceite del tanque..	48
Tabla N° 21.: Paso 14, etapa de precalentamiento, sistema listo para iniciar radiación.	49
Tabla N° 22.: Paso 15, etapa de radiación, inicio de la etapa de radiación.....	49
Tabla N° 23.: Paso 16, etapa de radiación, reseteo de seguridad.....	50

Tabla N° 24.: Paso 17, etapa de radiación, reseteo de seguridad..... 50

Tabla N° 25.: Paso 18, etapa de radiación, reseteo de seguridad TTU..... 50

Tabla N° 26.: Paso 19, etapa de radiación. 51

Tabla N° 27.: Paso 20, etapa de radiación, señales de corriente y voltaje de radiación. 52

LISTA DE FIGURAS

Figura N° 1.: Diagrama de bloques simple de un sistema de radar.	11
Figura N° 2.: Representación de las partes principales de un amplificador klystron de tres cavidades.	12
Figura N° 3.: Diagrama de bloques del transmisor con klystron.	15
Figura N° 4.: Representación de la sección transversal de un magnetrón convencional.	20
Figura N° 5.: Representación de la sección transversal de un magnetrón de cavidad coaxial.	22
Figura N° 6.: Diagrama de bloques del transmisor con magnetrón.	25
Figura N° 7.: Sistema SCADA	28
Figura N° 8.: Diagrama de bloques del SCADA del sistema de radar.	30
Figura N° 9.: Diagrama de flujo del algoritmo de control diseñado.	42
Figura N° 10.: Interfaz Hombre-Máquina.	60
Figura N° 11.: Diagrama de flujo de la información entre el sistema de transmisión y la PC industrial.	63
Figura N° 12.: Simulación del sistema (todas las señales funcionando correctamente 1).	65
Figura N° 13.: Simulación del sistema (todas las señales funcionando correctamente 2).	66
Figura N° 14.: Simulación del sistema (todas las señales funcionando correctamente 3).	67
Figura N° 15.: Simulación del sistema (falla de puerta).	68
Figura N° 16.: Simulación del sistema (error de los ventiladores).	69
Figura N° 17.: Simulación del sistema (error <i>TxMagnetronTemp</i> y <i>TxMagnetronOverCurrent</i>).	70
Figura N° 18.: Simulación del sistema (advertencia <i>TxFilaVoltVal 1</i>).	71
Figura N° 19.: Simulación del sistema (advertencia <i>TxFilaVoltVal 2</i>).	72
Figura N° 20.: Simulación del sistema (advertencia <i>TxFilaVoltVal 3</i>).	73
Figura N° 21.: Simulación del sistema (<i>TxMpsHvVal</i> fuera de rango).	74
Figura N° 22.: Simulación del sistema (error <i>TxFuseF7Stat</i> luego de estar radiando).	75

SIGLAS

AFC: “Automatic Frequency Control”, que significa “Control Automático de Frecuencia”.

ACU: “Antenna Control Unit”, que significa “Unidad de control de antena”.

CA: “Corriente Alterna”.

CW: “Continuous Wave”, que significa “Onda Continua”.

FAP: “Fuente de Alimentación Principal”.

HMI: “Human-Machine Interface”, que significa “Interfaz Hombre-Máquina”.

IED: “Intelligent Electronic Device”, que significa “Dispositivo electrónico inteligente”.

IF: “Intermediate Frequency”, que significa “Frecuencia Intermedia”.

IGBT: “Insulated Gate Bipolar Transistor”, que significa “Transistor Bipolar de Puerta Aislada”.

LCU: “Local Control Unit”, que significa “Unidad de Control Local”.

MPS: “Main Power Supply”, que significa “Fuente de Alimentación Principal” (MPS).

MTBF: “Mean Time Between Failures”, que significa “Tiempo medio entre fallos”.

MTI: “Moving Target Indication”. En español significa “Indicador de objetivo en movimiento”. Es un modo de funcionamiento de un radar para discriminar un objetivo contra el eco fijo.

PLC: “Programmable Logic Control”, que significa “Control Lógico Programable”.

PPM: “Periodic-Permanent-Magnetic”, que significa en español “Periódico-Magnético-Permanente”.

PRF: “Pulse Repetition Frequency”, que significa “Frecuencia de Repetición de Pulso”.

QML: “Qt Meta Language”, que significa “Meta Lenguaje Qt”.

RCP: “Radar Control Processor”, que significa “Procesador de Control del Radar”.

RF: “Radar Frequency”. En Ingeniería Eléctrica, RF significa radio frecuencia, pero en radar, a menudo se utiliza para referirse a la frecuencia del radar.

RSP: “Radar Signal Processing”, que significa “Procesador de Señales de Radar”.

RTU: “Remote Terminal Unit”, que significa “Unidad de terminal remota”.

RXCU: “Receiver Control Unit”, que significa “Unidad de control del receptor”.

SA: “Switch Array”, que significa “Arreglo de Interruptores”.

SCADA: “Supervisory Control And Data Acquisition”, que significa “Supervisión, Control y Adquisición de Datos”.

S/H: “Sample and Hold”, que significa “Muestreo y retención”.

TTU: “Trigger Transfer Unit”, que significa “Unidad de Transferencia de Disparo”.

TX: “Transmitter”, que significa “Transmisor”.

TXCU: “Transmitter Control Unit”, que significa “Unidad de Control del Transmisor”.

UHF: “Ultra high frequency”, que significa ultra alta frecuencia.

VSWR: “Voltage Standing Wave Ratio”, que significa “Razón de Voltaje de Onda Estacionaria”.

ACRÓNIMOS

Coho: “Coherent oscillator”, que significa “oscilador coherente”.

INAMEH: Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología.

Radar: “Radio Detecting And Ranging”, que significa “Radio detección a distancia”.

INTRODUCCIÓN

El Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMEH) es el organismo encargado de la adquisición de datos meteorológicos a nivel nacional, integrando y generando información hidrometeorológica para realizar pronósticos meteorológicos diarios, de los diferentes eventos próximos a ocurrir a lo largo del territorio nacional. Dicha institución cuenta con una serie de estaciones de radares meteorológicos a nivel nacional, esenciales para la recolección de información, que están compuestos principalmente por el módulo transmisor, receptor, el procesador de señales y la antena.

Actualmente, se desea realizar en el INAMEH un prototipo de transmisor con magnetrón y estudiar la factibilidad del cambio, ya que en estos momentos la red de radares funciona bajo la tecnología de tubo klystron en sus transmisores.

Por lo tanto en el capítulo I de este trabajo especial de grado se realiza el planteamiento del problema, la factibilidad técnica y económica de la propuesta y se plantean unos objetivos y un alcance a cumplir. Aquí se estudiarán tanto los aspectos técnicos como los económicos y las diferencias entre ambas propuestas para finalmente llegar a la conclusión de que el cambio es viable.

Posteriormente en el capítulo II, se plantea el marco teórico que engloba los conocimientos técnicos necesarios respecto al funcionamiento del tubo klystron y el magnetrón, además de los diferentes equipos necesarios para construir un transmisor de radar con cada uno de ellos.

El capítulo III se enfoca en el planteamiento del diseño, donde se muestra la selección de equipos a utilizar, el algoritmo y señales de control además de la selección de protocolo de comunicaciones, software a utilizar en el desarrollo de la programación del sistema de supervisión y control y de la interfaz hombre-máquina, finalizando con la programación de ambas y una descripción de la interfaz finalizada.

La simulación, resultados y la integración del diseño al sistema de radar se encuentran en el capítulo IV, demostrando diferentes situaciones que pueden ocurrir en el proceso de encendido de radar y el comportamiento del software de control diseñado.

Finalmente se presentan las conclusiones y recomendaciones para futuros proyectos basados en el uso del magnetrón fuente de la señal de un transmisor de radar.

CAPITULO I

1. GENERALIDADES

1.1. Planteamiento del Problema

El INAMEH cuenta con una serie de radares encargados de generar los datos meteorológicos a procesar, para ello los radares deben enviar un pulso electromagnético a la atmósfera, dicho pulso al colisionar con partículas de agua refleja parte de la energía a la antena del radar, este pulso de retorno es lo que se usa para calcular la masa de agua en la atmósfera y poder generar un pronóstico meteorológico.

Existen diversos dispositivos con los cuales se puede generar el pulso electromagnético que utiliza el radar, entre ellos encontramos el klystron y el magnetrón, en el INAMEH los radares utilizan actualmente transmisores con klystron para generar el pulso, pero el reemplazo de dichos dispositivos en caso de avería o caducidad es de un costo muy elevado, debido a que son dispositivos muy sofisticados y de difícil elaboración. El magnetrón por otro lado a pesar de ser un diseño más antiguo, puede obtener un rango de frecuencias más amplio y potencias de salida iguales que el klystron utilizando un voltaje menor, además en la actualidad la tecnología de magnetrón ha evolucionado, a tal punto que ya existen radares Doppler (radares que usan los ecos de retorno de blancos para medir su velocidad radial) con magnetrón y con un valor económico muy inferior al del tubo klystron.

Dado lo anterior, el INAMEH se plantea realizar el diseño para llevar a cabo el cambio de tecnología en el transmisor de klystron a magnetrón, en el sistema de radar existente, por lo que se requiere definir con detalle, todos los requerimientos en monitoreo y control necesarios para implementar la sustitución, ya que el principio de funcionamiento y condiciones de operación son distintas, además se debe

implementar una interfaz hombre-máquina (HMI) para monitorear y controlar las variables del transmisor a magnetrón.

1.2. Factibilidad del cambio de tecnología

El estudio de factibilidad del cambio de tecnología se dividió en dos etapas importantes, en primer lugar se realizó el estudio de factibilidad técnica donde se compararon las diferencias entre el klystron y el magnetrón y la diferencia entre los transmisores con ambos tubos, la segunda etapa consistió en el estudio de factibilidad económica donde se compararon los costos de ambos equipos y finalmente se llegó a la conclusión respecto a la factibilidad.

1.2.1. Factibilidad técnica

En la siguiente tabla tenemos una comparación de los valores básicos de operación del sistema, los valores del klystron actualmente en funcionamiento (VKS-8287) y los valores del magnetrón propuesto (TR 1077).

Tabla N° 1: Comparación de los valores básicos de operación.

	Requerida (instalada) en el sistema	Klystron	Magnetrón
Frecuencia	2740 MHz	2700 – 3000 MHz	2,7 – 2,9 GHz
PRF	300 - 1200Hz	Capacidad para cumplir con el PRF requerido	Capacidad para cumplir con el PRF requerido
Potencia pico	800-1500 kW	1000 kW	850 kW
Voltaje pico	90 kV	88 kV	36 kV
Corriente pico	50 A	50 A	50 A

En la tabla N° 1 se evidencia que tanto el equipo instalado como el propuesto en el diseño cumplen con las características requeridas por el radar, otros factores a tomar en cuenta son la cantidad de equipos y componentes que requieren ambos para trabajar.

En la siguiente tabla se tiene la comparación entre los equipos y componentes que necesita cada uno de los transmisores estudiados.

Tabla N° 2.: Comparación cantidad de equipos y componentes.

Klystron	Magnetron
Sensores de voltaje y corriente	Sensores de voltaje y corriente
Fuente de filamentos	Fuente de filamentos
Transformador de pulsos	Transformador de pulsos
Ventiladores de los gabinetes	Ventiladores de los gabinetes
Sensores de temperatura y nivel de aceite del tanque	Sensores de temperatura y nivel de aceite del tanque
Fuente de BIAS	Fuente de BIAS
Fuente de alimentación principal	Fuente de alimentación principal
Matriz de conmutadores	Matriz de conmutadores
Fuentes de alimentación de 5, 12 y 16V	Fuentes de alimentación de 5, 12 y 16V
Tarjeta temporizadora de disparo	Tarjeta temporizadora de disparo
Tarjeta del detector de corriente de pico	Tarjeta del detector de corriente de pico
Detector de arco de guía de onda	Detector de arco de guía de onda
Detector de arcos voltaicos en el cañón del klystron	-
Atenuador variable	-
Amplificador de excitación	-
Solenoides	-
Fuente de solenoide	-
Ventilador del solenoide	-
Fuente de alimentación de la bomba de vacío	-

En la tabla N° 2 se observa que el magnetron requiere de 7 equipos menos para su correcto funcionamiento (una reducción de equipos del 36.8%), esto se

traduce en menor probabilidad de fallas en el sistema, además debe tomarse en cuenta el tiempo perdido que acarrea alguna falla de algún componente, ya que el servicio técnico de cualquier equipo debe realizarse en Alemania, esto conlleva a enviar el equipo defectuoso, esperar la reparación y el envío de vuelta del equipo, por lo tanto si no existe repuesto de ese equipo particular el radar deja de funcionar el tiempo de la reparación.

Entre las desventajas del magnetrón encontramos su necesidad de una recepción coherente para poder trabajar (recepción que toma una muestra de la señal de salida para sincronizar la señal que se recibe), ya que cada pulso emitido por el magnetrón tiene una fase aleatoria, pero esto no es un problema en los radares del INAMEH, ya que el sistema tiene capacidad de recepción coherente.

Cabe destacar que tanto el klystron como el magnetrón, a pesar de su fase inicial aleatoria, cumplen con la necesidad del sistema de radar de funcionar en modo Doppler donde se realizan las mediciones de velocidad radial de las masas de aire.

La última comparación técnica entre ambas propuestas es la calidad de la señal, el klystron por su parte tiene una señal más limpia en el espectro radioeléctrico y una capacidad para enviar señales con mayor potencia, el magnetrón presenta una señal que genera ruido en las frecuencias cercanas a la frecuencia base, pero debe tomarse en cuenta que alrededor de la banda utilizada no existen equipos que puedan ser afectados.

Por lo planteado anteriormente, se concluye que el cambio de tecnología es técnicamente factible y además se presenta como una propuesta favorable, ya que las prestaciones del magnetrón como generador de la señal del transmisor son las necesarias para el sistema de radar, además del beneficio de simplificar el sistema instalado, teniendo menor cantidad de equipos, disminuyendo la probabilidad de falla del sistema y por lo tanto aumentando el tiempo de disponibilidad de los radares, además de la reducción en señales de control que se deben monitorear.

1.2.2. Factibilidad económica

En la factibilidad económica tenemos la comparación de precios entre el magnetrón TR-1077 y el klystron VKS-8287 actualmente instalado, que se muestra detalladamente en la siguiente tabla.

Tabla N° 3.: Comparación económica.

Equipo	Precio (\$)	Tasa de cambio	Precio (Bs)	Precio (Bs) después de nacionalización e impuestos
S-BAND KLYSTRON	116.704,33	6,3	735.237,26	955.808,44
MAGNETRON TR-1077	62.857,72	6,3	396.003,67	514.804,77

En la tabla N° 3 se tiene la comparación en costos de ambos equipos, se puede observar que el magnetrón es 53.846,61\$ menos costoso, una reducción del 46.1%, tomando en cuenta que el INAMEH posee ocho radares, el costo de los equipos juega un papel de suma importancia. Además se debe tomar en cuenta que hay 7 equipos extras que requiere el klystron para su funcionamiento y que posee un costo mayor a 100.000\$.

Por lo tanto el transmisor con magnetrón es una opción económicamente viable.

1.2.3. Conclusión de la factibilidad

Luego de observar la factibilidad técnica y económica, se concluye que el cambio de tecnología es viable.

El cambio de tecnología se presenta como una opción atractiva ya que presenta muchas ventajas, un ahorro económico de 46.1% en el costo, además de una disminución del 36.8% en el número de equipos utilizados, disminuyendo las probabilidades de falla del sistema, permitiendo una mejor calidad de servicio.

1.3. Objetivo General

Diseñar un sistema de supervisión y control de un transmisor a Magnetrón para un Radar Meteorológico del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMEH).

1.3.1. Objetivos Específicos

1. Investigar sobre el funcionamiento de un Magnetrón y las variables a considerar al controlar.
2. Seleccionar los sensores para realizar mediciones de variables necesarias para el control y monitoreo del transmisor.
3. Seleccionar el protocolo de comunicaciones que se utilizará para la comunicación de cada uno de los dispositivos que conformará el sistema.
4. Seleccionar el controlador que se utilizará.
5. Seleccionar el software de gestión de operaciones en tiempo real para el sistema y el software para la realización de una Interfaz Hombre-Máquina (HMI).
6. Diseñar la lógica de control a utilizar.
7. Diseñar una interfaz Hombre-Máquina, que permita un monitoreo y control de las diferentes variables que formen parte del sistema.
8. Simular el sistema con todos los sensores y controladores que tenga asociado.
9. Diseñar la integración al sistema de control del sistema de radar.
10. Validar el sistema propuesto.

1.4. Alcances

Este trabajo especial de grado tiene como alcance el diseño del transmisor a magnetrón y su integración en el sistema de radar actual, la implementación del diseño no está contemplada en esta tesis y podrá ser retomada en futuros trabajos con el INAMEH.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presenta el sistema de radar, enfocando principalmente el transmisor del radar, junto con los 2 equipos más utilizados en la generación de la señal para un transmisor de radar, se hará una descripción funcional tanto del klystron como del magnetrón, así como la descripción de los equipos que componen los sistemas de transmisión usando cada uno de ellos.

2.1. Sistema de Radar

El sistema de radar está conformado por 3 sistemas independientes principales, el sistema de transmisión, el sistema de la antena y el sistema de recepción y procesamiento de la señal, cada uno de estos sistemas cuentan con sus propios sistemas de control que son supervisados por un programa de radar que se comunica con los programas de análisis y visualización encargados de procesar los datos obtenidos por el radar. Esto puede ser observado en la siguiente figura donde se presenta el diagrama de bloques simple de un sistema de radar.

El bloque estudiado en este trabajo es el sistema de transmisión, ya que es el sistema donde se plantea el cambio de tecnología.

A continuación se presenta la descripción de funcionamiento y principales características del tubo klystron y magnetrón y la configuración de los transmisores utilizando cada uno de ellos como equipo generador de la señal de alta potencia.

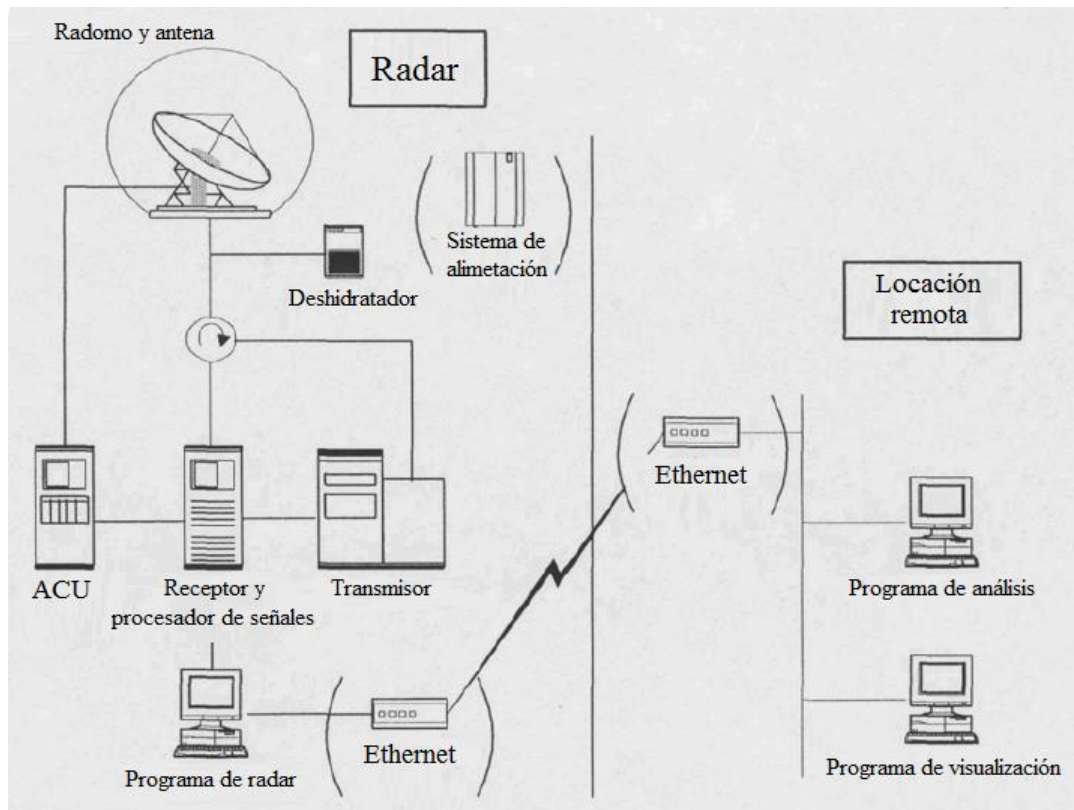


Figura N° 1.: Diagrama de bloques simple de un sistema de radar.

Fuente: Weather radar training 5.0, Estambul 2010.

2.2. Klystron (Leonov, 1998)

“Es una válvula de vacío de electrones, que funciona como un amplificador de ondas de alta potencia.

Los klystrons se utilizan principalmente como osciladores y amplificadores de alta potencia en transmisores de radar, y para los osciladores locales de baja potencia en los receptores (típicamente para las bandas de onda en centímetros).

Los klystrons operan desde las frecuencias de UHF hasta las longitudes de onda milimétricas y son usados en diversas aplicaciones como radares de vigilancia de aeropuertos, donde las potencias medias pueden llegar a más de un kW, en aviones militares, en los que la potencia media puede ser del orden de 10 kW o más, y en la

detección de largo alcance de los misiles balísticos intercontinentales, donde la potencia media por tubo puede ser superior a 100 kW.

En la siguiente figura se representan las partes principales de un klystron.

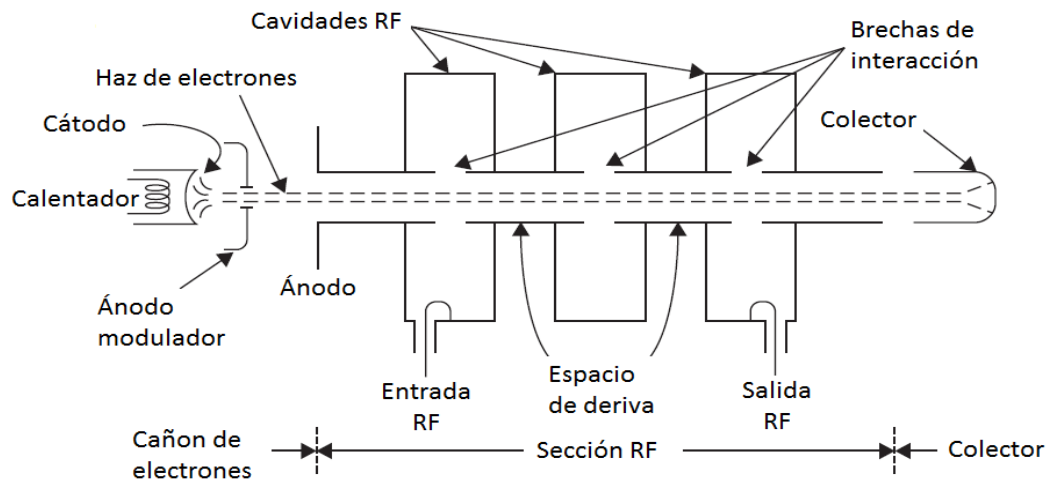


Figura N° 2.: Representación de las partes principales de un amplificador klystron de tres cavidades.

En la figura N° 2 se observa que a la izquierda se encuentra el calentador o fuente de filamentos, que se encarga de calentar el cátodo, entonces el cátodo emite una corriente de haces de electrones que se introducen en un estrecho cilíndrico de alta densidad de electrones. El cañón que genera el haz de electrones está compuesto por el cátodo, el ánodo de modulación (también llamado la red de control del haz), y el ánodo. El ánodo modular proporciona los medios para encender y apagar el haz de electrones. Las cavidades de RF son el equivalente de las microondas en un circuito resonante. Los electrones no se recolectan en el ánodo (como se hace en los tubos controlados por rejillas y tubos cruzados de campo), sino en el colector, que se muestra en el lado derecho de la ilustración, después de que el haz de electrones ha cedido toda su energía de RF en la cavidad de salida.

Una señal de baja potencia se aplica a la entrada de la primera cavidad y aparece en la brecha de interacción. Esos electrones presentes en el haz que llegan a la primera brecha de interacción, cuando el voltaje de la señal de entrada está en un máximo (el pico positivo de la onda sinusoidal), se aceleran en comparación con los electrones que llegan a la brecha cuando el voltaje de la señal de entrada es de un mínimo (en el punto mínimo de la onda sinusoidal). En el primer espacio de deriva, los electrones se aceleran durante el pico de un ciclo hasta alcanzar a los que se desaceleraron durante el mínimo del ciclo de RF anterior. El resultado es que los electrones se convierten periódicamente en "aglomerados". Este agrupamiento de los electrones puede considerarse como una modulación de la densidad de los mismos. Los aglomerados pasan a través de las brechas de interacción de la segunda cavidad, lo cual refuerza la densidad de modulación para mejorar el agrupamiento.

Este proceso de generar una variación de velocidad en el tiempo, que resulta en agrupamiento de los electrones de un haz de electrones inicialmente uniforme, se llama modulación de la velocidad. Tres o más cavidades de RF pueden ser utilizadas. La brecha de interacción de la cavidad de salida se coloca en el punto de máximo agrupamiento, de manera que la potencia de RF se pueda extraer de la densidad del haz de electrones, modulado por un bucle de acoplamiento en un tubo inferior, o por una guía de ondas (no mostrado en la figura) en un tubo de alta potencia.

En esencia, la energía de corriente continua del haz de electrones en la primera cavidad se convierte en energía de RF en la cavidad de salida, mediante el proceso de modulación de la velocidad. A mayor número de cavidades, mayor puede ser la ganancia del klystron. La ganancia de un klystron de cuatro cavidades puede ser más de 60 dB, dependiendo del ancho de banda. Después de que los electrones amontonados entregan su potencia de RF a la salida, los electrones usados se eliminan mediante el electrodo colector.

Un campo magnético axial se emplea para contrarrestar la repulsión mutua de los electrones que forman el haz de electrones. El campo magnético confina los

electrones a un haz muy delgado y relativamente largo, que impide la dispersión de los mismos. Puede ser generado por un solenoide largo, recubierto de hierro alrededor de su diámetro exterior, o por un sistema más ligero de peso periódico magnético permanente (PPM), que se compone de una serie de lentes magnéticas.

Un klystron multicavidad puede tener su ancho de banda aumentado al tener un ajuste escalonado de sus cavidades, para obtener un ancho de banda más amplio. Sin embargo, es complicado hacer esto en el klystron, ya que la modulación de la velocidad que aparece en cada brecha de interacción contribuye a un componente de la corriente de excitación en las brechas venideras.

La teoría muestra que el ancho de banda de un klystron se puede aumentar significativamente mediante el aumento de su corriente y por lo tanto su potencia. Un klystron de 10 MW de potencia pico, por ejemplo, puede tener un ancho de banda de 8% en comparación con un tubo de 200 kW, que podría tener un ancho de banda de 2%, y un tubo de 1 kW que tiene un ancho de banda de sólo 0,5%. Los klystrons multicavidad de alta potencia pueden ser diseñados con anchos de banda tan grandes como 10 a 12%.

El klystron, como un ejemplo de un tubo de haz lineal, es capaz de tener una alta potencia debido a la generación del haz de electrones, su interacción con el campo electromagnético, y la recolección de los electrones usados, se llevan a cabo en partes separadas del tubo donde el calor generado puede ser disipado efectivamente.

El klystron puede tener una larga vida. Se ha reportado que el tiempo medio entre fallos (MTBF) para 11 aplicaciones diferentes de klystrons en sistemas de radar, variaba de 75.000 horas a 5.000 horas, con un promedio de 37.000 horas para todas las 11 aplicaciones”^[2].

2.3. Transmisor con klystron

Un transmisor con klystron cuenta con una serie de componentes y equipos necesarios para funcionar de forma óptima, a continuación se presenta un diagrama de bloques simplificado del transmisor, en donde se muestran los principales componentes que lo integran, los cuales serán explicados posteriormente.

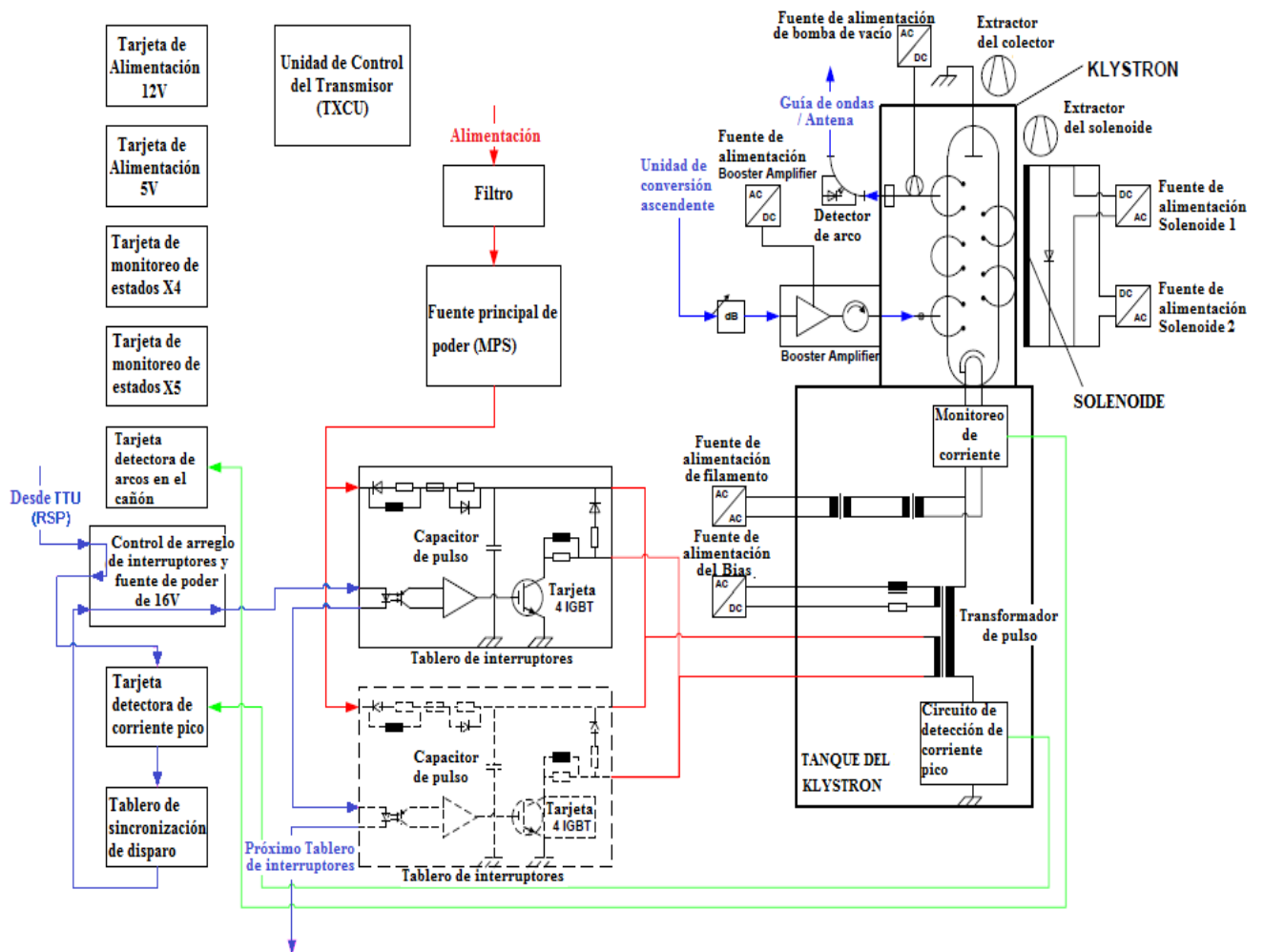


Figura N° 3.: Diagrama de bloques del transmisor con klystron.

Fuente: Gematronik Training Manual.

2.3.1. Entrada de línea y conjunto de distribución de alimentación

La línea de energía desde la caja de distribución que lleva al conjunto de entrada de línea y distribución de energía, donde están contenidos los principales fusibles y conmutadores del TX. La llave de TX es seguida por un filtro de línea y un riel de distribución de energía.

2.3.2. Fuente de Alimentación Principal (MPS)

La MPS es la fuente de alimentación que carga los capacitores de la matriz de conmutadores permitiendo luego la radiación del transmisor.

2.3.3. Matriz de conmutadores (SA)

La matriz de conmutadores contiene 6 tarjetas de conmutadores (SB). Cada tarjeta se caracteriza por contener 4 conmutadores IGBT. Cuando la matriz de conmutadores es disparada, los capacitores de carga de la tarjeta de conmutadores se conectan al devanado primario del transformador de pulsos.

2.3.4. Transformador de pulsos

El transformador de pulsos adapta el pulso de baja tensión y alta corriente de la matriz de conmutadores al pulso de alta tensión y baja corriente requerida por el tubo klystron. Se caracteriza por un devanado de polarización para aplicar una corriente de premagnetización permanente, para prevenir la saturación y reducir la caída de tensión.

2.3.5. Fuente de alimentación de polarización (Fuente de BIAS)

La fuente de alimentación de polarización es una fuente de alimentación conmutada, que genera una tensión de CA de alta frecuencia. Esta tensión de CA es transformada en alta corriente, rectificadora, y filtrada para proveer la alta corriente necesaria para la premagnetización del solenoide.

2.3.6. Detector de arco de cañón

El detector de arco de cañón detecta arcos voltaicos en el cañón del klystron e interrumpe el disparo de ser observado.

2.3.7. Fuentes de alimentación de 5, 12 y 16V

Fuentes de alimentación de corriente directa para las diferentes tarjetas de control y ventiladores.

2.3.8. Tarjeta de control de la matriz de conmutadores

El disparo del procesador de radar RSP es aplicado a la tarjeta de control de la matriz de conmutadores a través de la Unidad de Transferencia de Disparo (TTU). El modulador es sensible al ancho de disparo, se dispara en el borde creciente del pulso de disparo y se desconecta en el borde decreciente. La tarjeta amplifica la señal de disparo.

2.3.9. Tarjeta del detector de corriente de pico

Desde la tarjeta de la matriz de conmutadores, el disparo se canaliza a la tarjeta del detector de corriente de pico. Esta tarjeta presenta un circuito de muestreo y retención, que toma muestras del pulso de corriente del haz y provee un voltaje que es proporcional a la corriente pico para propósitos de supervisión. La señal de disparo se repone y prepara el circuito S/H.

2.3.10. Tarjeta temporizadora de disparo

Desde la tarjeta detectora de corriente de pico, el disparo es canalizado a la tarjeta temporizadora de disparo. Esta tarjeta controla que el ancho del pulso sea menor a $6\mu\text{s}$. Si el ancho del pulso es mayor de $6\mu\text{s}$, solo se permite el paso si el PRF es menor de 50 Hz.

2.3.11. Tarjeta de conmutadores

Desde la tarjeta temporizadora de disparo, el disparo es canalizado nuevamente a la tarjeta de control de la matriz de conmutadores, donde es amplificado y canalizado hacia la tarjeta de conmutadores. Para los fines de la sincronización de todos los conmutadores, es necesario que la señal de disparo sea aplicada simultáneamente a todas las tarjetas. Por lo tanto la señal de disparo es aplicada utilizando la técnica del bucle. La corriente del bucle estará cerrada solo si todos los cables están conectados a sus respectivas tarjetas de conmutación. Si solo una de las conexiones está abierta, el modulador no se conmutará.

2.3.12. Atenuador variable

La señal de RF del convertidor ascendente del receptor es aplicada a un atenuador variable. El atenuador es ajustado de tal manera que el valor de potencia sea el mismo que el indicado en la placa del klystron.

2.3.13. Amplificador de excitación

El amplificador de excitación provee el nivel de potencia necesaria para excitar el klystron. Es un amplificador de onda continua (CW) clase A. Su salida está protegida por un aislador integrado.

2.3.14. Klystron

El klystron amplifica la señal de RF del amplificador excitador y es enviada a través de la guía de ondas hacia la antena para ser disparada a la atmosfera.

2.3.15. Detector de arco de guía de onda

Este dispositivo detecta arcos en la ventana de salida del klystron. Los arcos pueden romper la ventana permitiendo que el aire entre en la parte de alto vacío del tubo y lo destruya. El disparo es interrumpido si se observa un arco.

2.3.16. Solenoide

El solenoide es un electromagneto de alta potencia enfriado por aire.

2.3.17. Fuente de alimentación del solenoide

La fuente de alimentación del solenoide consiste en dos fuentes de alimentación conmutadas en paralelo, corregidas en su factor de potencia. Está provista de un diodo de protección, que permite que la inductancia del magneto se descargue cuando se desconecta la alimentación.

2.3.18. Ventilador del solenoide

El ventilador del solenoide extrae el aire caliente del electromagneto. Una fracción de la corriente de aire también es utilizada para enfriar el cuerpo del tubo.

2.3.19. Fuente de alimentación del filamento

Esta es una fuente de alimentación conmutada que genera tensiones de corriente alterna de alta frecuencia. Esta tensión de alta frecuencia es encaminada hacia el tanque, en donde es transformada, rectificadora, y filtrada para proveer el voltaje requerido por el filamento. La tensión se ajusta al valor indicado en la placa del tubo.

2.3.20. Fuente de alimentación de la bomba de vacío

Es la encargada de proveer la alta tensión necesaria para la bomba de vacío del tubo.

2.3.21. Ventilador del colector

Este ventilador succiona el aire caliente del colector.

2.4. Magnetron (Skolnik, 2008)

“Un magnetron es un elemento eléctrico capaz de convertir energía de corriente continua en energía de alta frecuencia y de una determinada longitud de onda. Es un oscilador de alta potencia capaz de trabajar con alta eficiencia y potencia.

En la siguiente figura se muestra la representación de un corte transversal de un magnetron convencional.

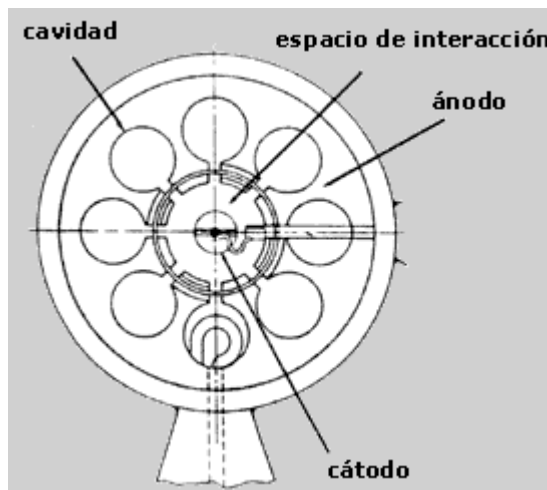


Figura N° 4.: Representación de la sección transversal de un magnetron convencional.

Como ejemplo de uno de los primeros magnetrones utilizado, se tiene el 5J26, un tubo de banda L que era mecánicamente ajustable desde 1.250 hasta 1.350 MHz. Podía funcionar con una potencia pico de 500 kW, un ancho de pulso de 1 μ s, y una frecuencia de repetición de pulso de 1.000 Hz, que proporciona una potencia media de 500 W. Su eficiencia de 40% era la típica de magnetrones en esa época. El compacto y eficiente tamaño de operación del magnetron a frecuencias de microondas, permitió que los radares en la Segunda Guerra Mundial fueran lo suficientemente pequeños como para volar en aviones militares y para tener movilidad en la guerra terrestre. Los magnetrones, sin embargo, estaban limitados a unos pocos kilovatios de potencia media, lo que puede limitar su utilidad. Ellos también tienen limitaciones en la estabilidad y, por lo tanto, en el factor de mejora de

MTI que pueden lograr, y que a menudo tienen una vida más corta que los tubos de haz lineal.

Debido a que el magnetrón es un oscilador en vez de un amplificador, la fase de inicio de cada pulso es aleatoria de pulso a pulso. Este cambio aleatorio de fase puede ser obviado en un receptor de radar MTI mediante el uso de un oscilador coherente (coho), que utiliza como la señal de referencia de fase del receptor una muestra de la señal transmitida, por lo tanto en cada pulso, la fase del pulso de magnetrón establece la fase del coho. De esta manera, la señal recibida parece ser coherente pulso a pulso. Esto se llama "coherencia en recepción".

El Control Automático de Frecuencia (AFC), se emplea a menudo para mantener el receptor sintonizado a la frecuencia del transmisor, ya que la frecuencia de magnetrón puede desviarse lentamente con los cambios en la temperatura ambiente y el auto calentamiento. El AFC se puede aplicar al propio magnetrón para que funcione en su frecuencia asignada, dentro de los límites de la precisión del mecanismo de sintonización.

Un magnetrón puede cambiar mecánicamente su frecuencia en un rango que va de 5 a 10% y, en algunos casos, tanto como 25%. Una sintonización mecánica rápida, se puede lograr con un disco ranurado, suspendido por encima de las cavidades del ánodo. Al girarlo, proporciona una carga inductiva y capacitiva de las cavidades alternadamente, para aumentar y disminuir la frecuencia. Un magnetrón giratorio sintonizado puede proporcionar velocidades de ajuste muy rápidas. Por ejemplo, a una velocidad de rotación de 1.800 rpm, un magnetrón con 10 cavidades puede sintonizar a través de una banda unas 300 veces por segundo.

2.5. Magnetron coaxial

Una mejora significativa en la potencia, la eficiencia, la estabilidad, y la vida de la forma original del magnetron se produjo con la introducción del magnetron

coaxial. La principal diferencia es la incorporación de una cavidad estabilizadora que rodea las cavidades de magnetrón convencional, con la cavidad estabilizadora acoplada a las cavidades de magnetrón con el fin de una mejor estabilidad. La frecuencia de un magnetrón coaxial puede cambiarse moviendo mecánicamente una de las placas terminales, a lo que se llama pistón sintonizado de la cavidad estabilizadora. El pistón sintonizado se puede posicionar mecánicamente desde el exterior del vacío, por medio de un fuelle de vacío.

En el magnetrón coaxial, la salida de cualquier cavidad resonante está acoplada a la cavidad estabilizadora que rodea la estructura de ánodo. La potencia de salida se acopla posteriormente a partir de la cavidad estabilizadora. En la figura N° 5, se muestra el esquema general de un magnetrón coaxial y sus partes principales.

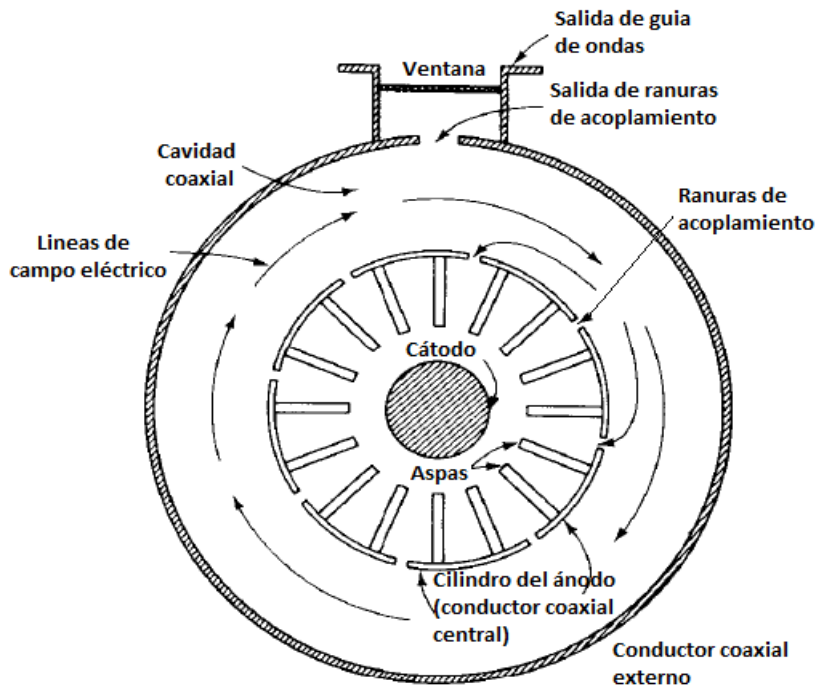


Figura N° 5.: Representación de la sección transversal de un magnetrón de cavidad coaxial.

Modo de funcionamiento π

Un magnetrón, ya sea convencional o coaxial, puede oscilar en un número de diferentes frecuencias, muy próximas entre sí, debido a las diversas configuraciones posibles del campo de RF, que pueden existir entre el cátodo y las cavidades resonantes.

Estas diferentes configuraciones de campo de RF, junto con el acoplamiento entre las cavidades resonadoras del magnetrón, dan como resultado diferentes modos de oscilación. El magnetrón puede cambiar, casi de forma impredecible, de un modo a otro (lo que significa que la frecuencia puede cambiar de forma impredecible), así como los cambios de voltaje o de impedancia de entrada cuando el magnetrón experimenta dichos cambios de modo. El paso de un modo a otro es llamado a menudo "moding", esto es contraproducente, ya que puede ocurrir cuando se lleva a cabo los escaneos de la antena del radar y por consiguiente, se generan vistas diferentes a los entornos deseados.

El modo preferido de funcionamiento del magnetrón es el llamado modo π , que se produce cuando la configuración del campo de RF es tal que la fase de RF se alterna en 180° (π radianes) entre cavidades adyacentes. La ventaja del modo π es que su frecuencia puede ser separada más fácilmente de las frecuencias de los otros modos posibles (un magnetrón de N cavidades puede tener $N/2$ modos posibles. El modo π oscila a una frecuencia única, pero los otros modos pueden oscilar a dos frecuencias diferentes de manera que el magnetrón puede oscilar a $N-1$ frecuencias diferentes).

Vida del magnetrón coaxial

La energía que puede ser producida por un magnetrón depende de su tamaño. Un tamaño más grande da como resultado un mayor resonador, lo que hace más difícil separar los distintos modos de oscilación en un magnetrón convencional. El

magnetron coaxial, sin embargo, con la estabilización controlada por la cavidad exterior, permite un funcionamiento estable con un mayor número de cavidades, y por lo tanto con una potencia mayor. Las estructuras de ánodo y cátodo de un magnetron coaxial también pueden ser más grandes, lo que permite un funcionamiento a una potencia mayor. Las estructuras más grandes permiten un diseño más conservador, teniendo como resultado una vida más larga y una mejor fiabilidad que los magnetrones convencionales, así como un funcionamiento más estable. Se ha llegado a verificar que la vida útil de un magnetron coaxial está entre 10.000 y 15.000 horas, que es de cinco a veinte veces mayor en comparación con el tiempo de vida útil de magnetrones convencionales de alta potencia”^[1].

2.6. Transmisor con magnetron

Un transmisor con magnetron está compuesto por una serie de componentes y equipos, ya que el transmisor consta de los mismos equipos explicados anteriormente en el apartado del transmisor con klystron con la excepción de ciertos aparatos mencionados anteriormente que no son necesarios para el transmisor con magnetron, se procederá a enumerarlos únicamente, el único equipo adicional es el magnetron como tal, que es el equipo encargado de generar la señal RF de alta potencia para enviar a la atmósfera.

A continuación se presenta un diagrama de bloques simplificado del proceso de transmisión con magnetron, en donde se muestran los principales componentes que lo integran, los cuales fueron explicados para el caso del transmisor con klystron.

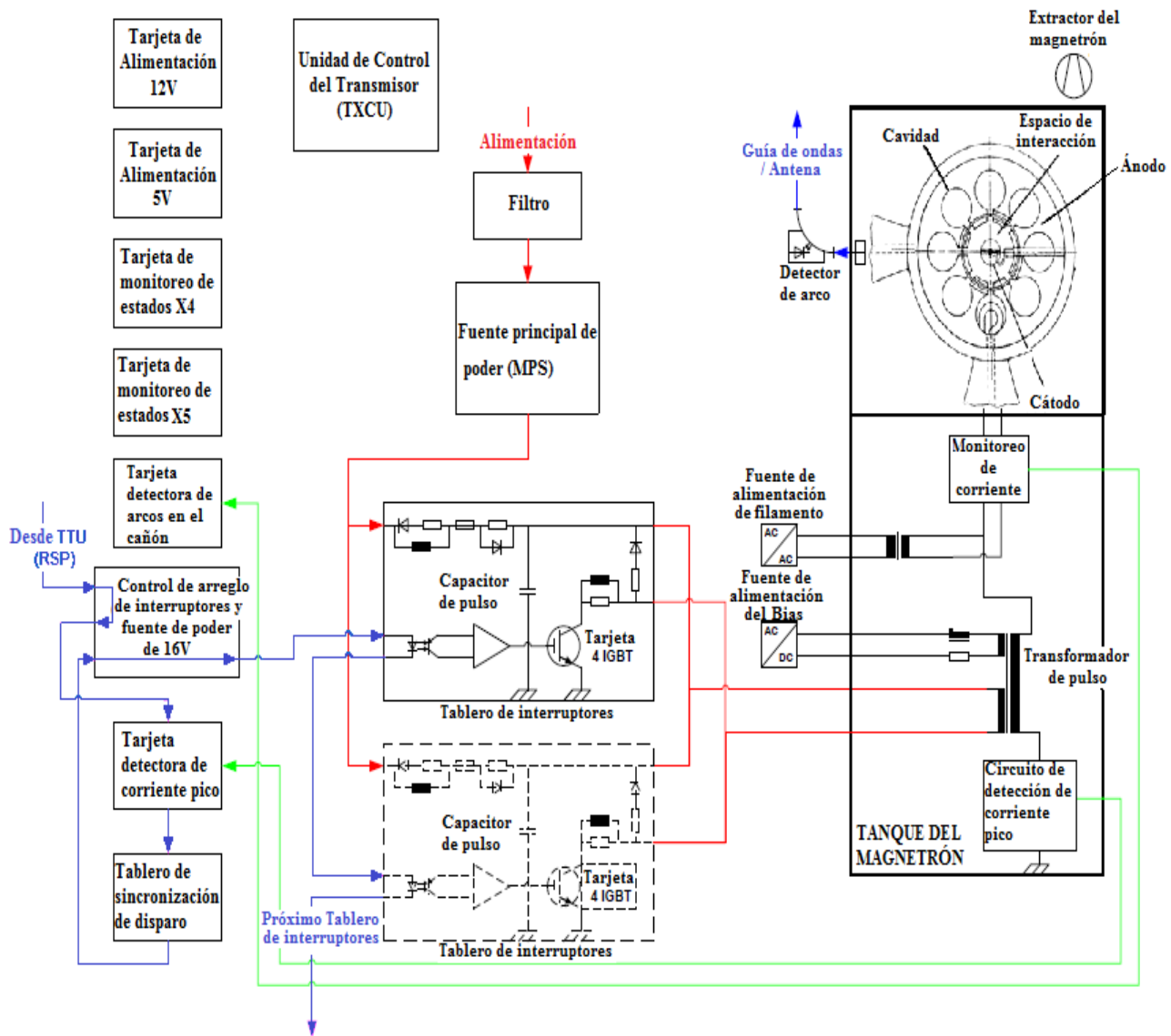


Figura N° 6.: Diagrama de bloques del transmisor con magnetrón.

Fuente: Gematronik Training Manual, modificado.

2.6.1. Magnetron

2.6.2. Entrada de línea / conjunto de distribución de alimentación

2.6.3. Fuente de alimentación principal (MPS)

2.6.4. Matriz de conmutadores (SA)

- 2.6.5. Transformador de pulsos**
- 2.6.6. Fuente de alimentación de polarización (Fuente de BIAS)**
- 2.6.7. Fuentes de alimentación de 5, 12 y 16V**
- 2.6.8. Tarjeta de control de la matriz de conmutadores**
- 2.6.9. Tarjeta del detector de corriente de pico**
- 2.6.10. Tarjeta temporizadora de disparo**
- 2.6.11. Tarjeta de conmutadores**
- 2.6.12. Detector de arco de guía de onda**
- 2.6.13. Fuente de alimentación del filamento**

Luego de haber explicado cada componente que integra los transmisores con klystron y magnetrón, se procede a explicar el sistema SCADA de control que será de utilidad a la hora del diseño en este trabajo especial de grado.

2.7. Sistema SCADA (Rodríguez Penin, 2007)

“Los sistemas SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition o Control con supervisión y adquisición de datos) son programas que permiten el acceso a datos remotos de un proceso y además permiten, utilizando herramientas de comunicación necesarias en cada caso, el control del mismo.

Los objetivos para que su instalación sea aprovechada son los siguientes:

- Funcionalidad completa de manejo y visualización en un sistema operativo en cualquier PC estándar.

- Sencillez de instalación, sin exigencias de hardware elevadas, fáciles de utilizar y con interfaces amigables con el usuario.

Entre las prestaciones de una herramienta de este tipo destacan:

La monitorización: Que es la representación de datos en tiempo real a los operadores de planta, allí se leen los datos de los sensores de campo y/o otras señales del sistema.

La supervisión: Tiene que ver con la supervisión, mando y adquisición de datos de un proceso y herramientas de gestión para la toma de decisiones. Tienen además la capacidad de ejecutar programas que puedan supervisar y modificar el control establecido, esto evita una continua supervisión humana.

La adquisición de datos de los procesos en observación: La adquisición de datos para un historial, guardando los valores y evaluándolos a posterioridad.

La visualización de los estados de las señales del sistema (alarmas y eventos): Reconocimiento de eventos excepcionales acaecidos en el sistema y su inmediata puesta en conocimiento a los operarios para efectuar las acciones correctoras pertinentes. En la figura N° 7, se muestra un ejemplo de un sistema que utiliza un SCADA, nótese que la red de SCADA está comunicándose directamente con los dispositivos de campo ya sea por buses de campo como MODBUS o PROFIBUS, o por medio de conexiones Ethernet. Desde las computadoras conectadas al SCADA se puede monitorear, supervisar y controlar cualquier dispositivo de campo, y desde una escala de red superior se puede monitorear todo lo que realiza el sistema SCADA por ejemplo desde una oficina a kilómetros de distancia del proceso.

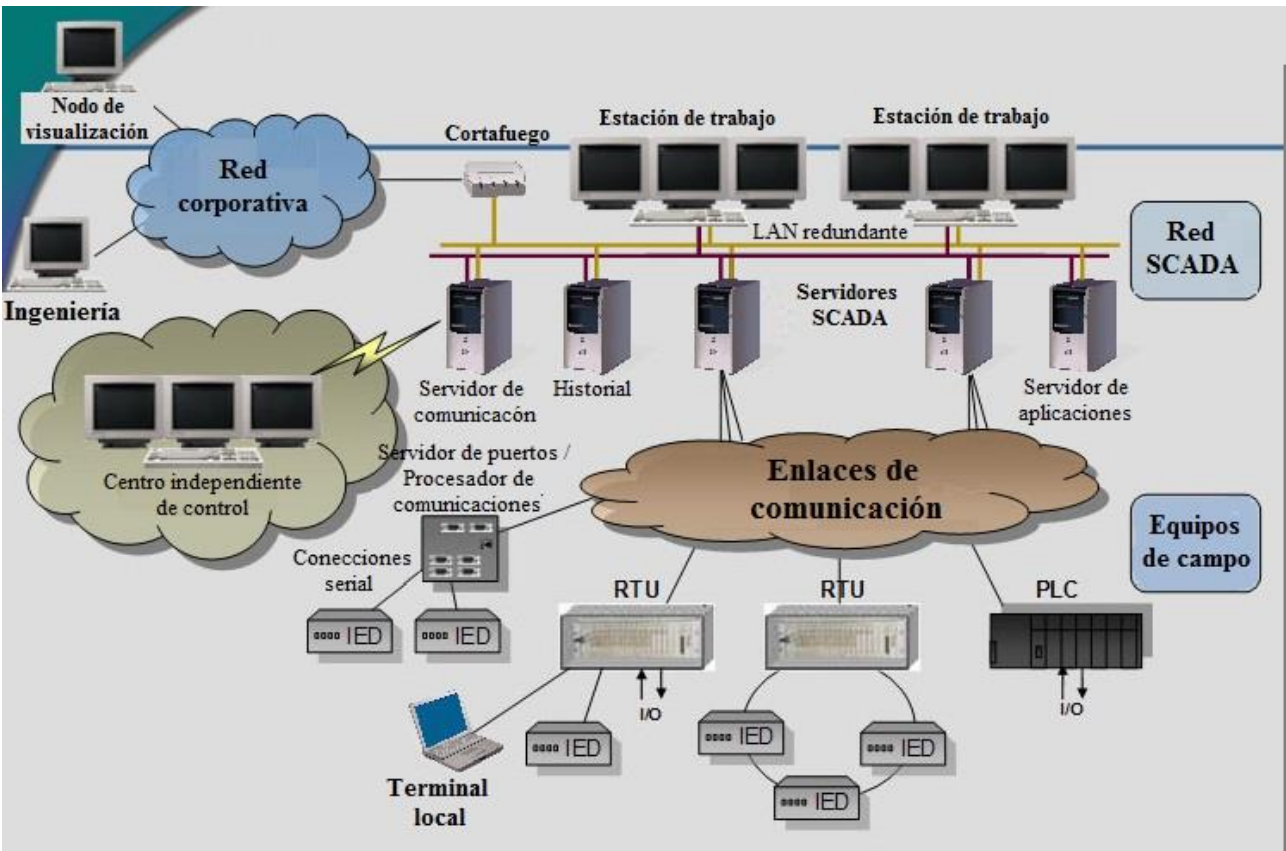


Figura N° 7.: Sistema SCADA

2.7.1. Programas más usados en SCADA

De una u otra forma, cada vez que se ha realizado el control de un sistema, ha sido necesario tener información visual de cómo está funcionando. Así, a medida que los sistemas de control han ido evolucionando y se han hecho cada vez más complejos, ha aumentado también la complejidad de los elementos que proporcionan la información al usuario.

La aparición de la informática permitió realizar el control de una máquina a distancia de manera sencilla; los grandes cuadros de control empezaban a convertirse en monitores que podían mostrar la misma información. Por ello varios fabricantes desarrollaron entonces paquetes de programas capaces de comunicarse con los

sistemas de control existentes y permitieron así una flexibilidad de uso no imaginada hasta el momento. Esta tendencia ha ido en aumento, de tal manera que hoy día las opciones existentes son muy numerosas. Algunos de los más conocidos son:

- Intellution (IFIX)
- Omron (SCS)
- Siemens (WinCC)
- Rockwell Automation (RS-View)
- Wonderware (InTouch)
- GE-Fanuc (Cimplicity)

Con la irrupción de Internet en el mundo de las comunicaciones industriales, ahora es posible conectarse con un sistema de control situado en cualquier lugar del mundo gracias a la tecnología Web-Server: un computador dotado de un explorador y la dirección IP del sistema que se quiere visualizar es suficiente” [3].

En la actualidad, los sistemas SCADA se usan en todo tipo de industrias en las que se requiera de un control automático para los procesos con adquisición de datos y su posterior almacenamiento en una base de datos históricos, por lo que es muy común encontrar este tipo de sistemas en todos los procesos industriales, sobre todo en aquellos que se encuentren en lugares de difícil acceso, ya que se puede controlar a distancia sin necesidad de estar presente en el lugar.

2.7.2. SCADA del sistema de radar

En la siguiente figura se muestra el diagrama de bloques del SCADA de los sistemas de radares del INAMEH.

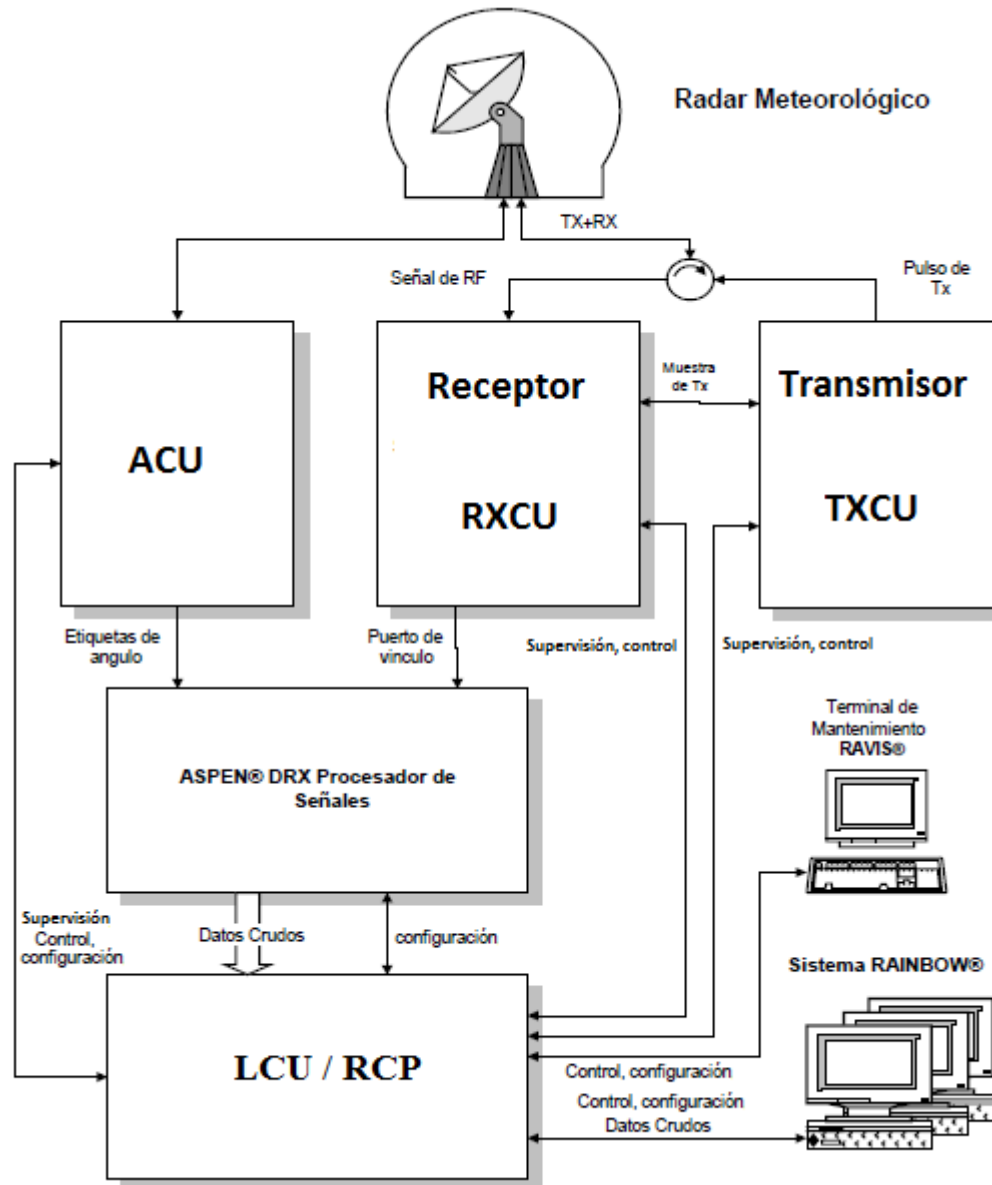


Figura N° 8.: Diagrama de bloques del SCADA del sistema de radar.

Fuente: Weather radar training 5.0, Estambul 2010.

En el diagrama de bloques de la figura anterior podemos observar los diferentes niveles de jerarquía en el control del sistema, teniendo la unidad de control de antena, la unidad de control del receptor y la unidad de control del transmisor en el

mismo nivel, este siendo supervisado y controlado por la unidad de control local, y en el nivel superior se tienen el sistema Rainbow® y el terminal de mantenimiento Ravis®.

CAPITULO III

3. METODOLOGÍA

Para el desarrollo de este trabajo, se divide el proyecto en 6 fases, que serán explicadas a continuación:

Fase 1:

La primera fase contempla el análisis e investigación sobre diferencias técnicas y económicas entre el tubo klystron y el magnetrón, y un estudio de factibilidad respecto al cambio de tecnología para el transmisor del radar, además se determinan que señales que debían monitorearse y cuales variables deben controlarse en el proceso de encendido del transmisor.

Fase 2:

Se realiza una elección de los equipos a utilizar para el correcto funcionamiento del transmisor con magnetrón, se identifican las señales de control que se deben monitorear, y además se elige el protocolo de comunicaciones que enlazaría los equipos que componen el transmisor.

Fase 3:

En la tercera fase se realiza la elección del controlador a utilizar en el sistema y se plantea un algoritmo para el encendido y funcionamiento del transmisor del radar.

Fase 4:

La cuarta fase consta de la programación del control y la elección del software para el desarrollo de la interfaz hombre-máquina, que debe mostrar al operador el estado de todas las señales del sistema en tiempo real, mientras lo mantiene informado del proceso que se está realizando en el transmisor.

Fase 5:

En la quinta fase se plantea la programación de la interfaz hombre-máquina, que se encarga de la adquisición y almacenamiento de los datos del sistema para posterior análisis, además de permitir el control sobre el proceso de encendido del sistema, en modo manual o automático.

Fase 6:

En la última fase se simula el proceso de encendido del transmisor, emulando distintas situaciones de falla y observando el comportamiento del programa frente a estas alarmas y errores, y por último se plantea la integración del control del transmisor diseñado al sistema de radar para su futura implementación.

CAPITULO IV

4. PROPUESTA DE DISEÑO DEL SISTEMA DE SUPERVISIÓN Y CONTROL

4.1. Desarrollo del diseño

A continuación se presenta la propuesta de diseño del sistema de supervisión y control para el transmisor con magnetrón, este contará con las prestaciones básicas de un sistema SCADA, pero a nivel local, controlando y supervisando los equipos y sus señales de comando y control.

Se detallarán los pasos a seguir para la realización del diseño planteado para este trabajo especial de grado, se presentará la selección de los equipos a usar, sus señales de control y el algoritmo de control a utilizar, además de la selección del protocolo de comunicaciones para el diseño.

Posteriormente se presenta la selección del controlador, de la aplicación de programación y del programa para la realización de la interfaz hombre-máquina, luego se detalla el proceso de programación tanto del control como de la interfaz visual y finalmente se explica la función de las diferentes áreas que componen la HMI.

4.1.1. Selección de equipos

Para el cambio de tecnología de transmisor se deben remover ciertos equipos que son necesarios para el funcionamiento del klystron, pero que no cumplen ninguna función para el transmisor con magnetrón, los equipos a remover son:

- a) Klystron
- b) Detector de arcos del cañón

- c) Solenoide
- d) Fuente de alimentación del solenoide
- e) Ventilador del solenoide
- f) Fuente de alimentación de la bomba de vacío
- g) Amplificador de excitación.
- h) Atenuador Variable
- i) Ventilador del colector

El magnetrón no requiere equipos nuevos a integrar en el sistema para su funcionamiento, ya que los sensores y equipos que se utilizan actualmente con el klystron son suficientes para todas las mediciones de control necesarias, por lo tanto el único equipo nuevo en el transmisor será el propio magnetrón.

Por lo tanto los equipos a utilizar son los siguientes:

- Magnetrón
- Fuente de alimentación principal (MPS)
- Matriz de conmutadores (SA)
- Transformador de pulsos
- Fuente de alimentación de polarización (Fuente de BIAS)
- Fuentes de alimentación de 5, 12 y 16V
- Tarjeta de control de la matriz de conmutadores
- Tarjeta del detector de corriente de pico
- Tarjeta temporizadora de disparo
- Tarjeta de conmutadores
- Detector de arco de guía de onda
- Fuente de alimentación del filamento

Todos los equipos a utilizar son fabricados por SELEX-Gematronik, específicamente diseñados para el funcionamiento en sistemas de radares.

4.1.2. Señales de control

Las señales de control del transmisor a magnetrón serán presentadas de acuerdo a las diferentes etapas del encendido del transmisor, y finalmente se presentarán las señales de comando que reciben los equipos para realizar sus funciones primarias, con la descripción de cada una de las señales.

En la tabla N° 4, se presentan las señales de la etapa de preparación del transmisor, donde se verifican el correcto funcionamiento de los fusibles principales, el estado de emergencia, los ventiladores de los gabinetes, la fase correcta de la fuente trifásica y que la puerta del gabinete esté cerrada correctamente.

Tabla N° 4.: Señales de control de un transmisor a magnetrón en su etapa de preparación.

Nombre de la señal	Descripción	Tipo de señal
TxDoorIntStat	Estado de la puerta del gabinete del klystron	0-24V
TxFuseL123Stat	Estado del fusible de las tres fases de alimentación.	0-24V
TxEmergencyStat	Estado de la llave de emergencia de la puerta frontal	0-24V
TxPhaseDetectionStat	Estado de la relación de las tres fases de la fuente de alimentación del ventilador	0-24V
TxFuseF3Stat	Estado del tercer fusible, protege el ventilador del gabinete del magnetrón	0-24V
TxFuseF4Stat	Estado del cuarto fusible, protege la fuente de alimentación de excitación del transformador.	0-24V
TxFuseF5Stat	Estado del quinto fusible, protege las fuentes de alimentación de 12V	0-24V
TxFuseF6Stat	Estado del sexto fusible, protege la fuente de alimentación de 5V	0-24V
TxFuseF7Stat	Estado del séptimo fusible, protege la fuente de alimentación de 16V	0-24V
TxCabinBlower1Stat	Estado del ventilador de la parte posterior del primer gabinete de modulador	0-24V
TxCabinBlower2Stat	Estado del ventilador de la parte posterior del segundo gabinete de modulador	0-24V
TxCabinBlower3Stat	Estado del ventilador de la parte posterior del tercer gabinete de modulador	0-24V
TxTubeBlowerStat	Estado del ventilador del magnetrón.	0-24V

En la tabla N° 5, se presentan las señales de la etapa de precalentamiento del transmisor, donde se verifican las señales de las fuentes de corriente directa de diferentes voltajes, el estado de la corriente de premagnetización del transformador de pulsos, el estado de la corriente de filamentos del magnetrón, el estado del MPS, los

estados de nivel y temperatura del aceite del transformador de pulsos, la señal de *Standby* del transmisor y finalmente el valor analógico del voltaje de filamentos.

Tabla N° 5.: Señales de control de un transmisor a magnetrón en su etapa de precalentamiento.

Nombre de la señal	Descripción	Tipo de señal
TxTrafoBiasStat	Estado de la fuente de alimentación de la excitación del transformador de pulsos	0-24V
TxPS12VDC1Stat	Estado de la primer fuente de alimentación de 12V	0-24V
TxPS12VDC2Stat	Estado de la segunda fuente de alimentación de 12V	0-24V
TxPS16VDCStat	Estado de la fuente de alimentación de 16V para la tarjeta de la matriz de llaves de control	0-24V
TxPS5VDCStat	Estado de la fuente de alimentación de 5V	0-24V
TxFilaCurStat	Estado de la corriente de la fuente de filamento	0-24V
TxWGairStat	Estado de la presión de aire en la guía de onda	0-24V
TxMpsStat	Estado de la fuente de alimentación principal	0-24V
TxOilLevelStat	Estado del indicador de nivel de aceite del tanque	0-24V
TxOilTempStat	Estado de la temperatura de aceite	0-24V
TxStandbyStat	Estado del <i>Standby</i> del transmisor	0-24V
TxFilaVoltVal	Porcentaje de la corriente máxima de filamento que está fluyendo cuando se aplica la tensión máxima de la fuente	Analógica 0-10 V

En la tabla N° 6, se tienen las señales del transmisor en la etapa de radiación, en dicha etapa se vigilan las señales de temperatura, voltaje, corriente pico y corriente de carga del arreglo de interruptores (*SwitchArray*), se tienen las señales del estado de alto voltaje y temperatura del MPS, el sensor de arcos de la guía de ondas, la

temperatura y sobrecorriente del magnetrón, y las señales de falla, VSWR y detector de arcos en el cañón del TTU y finalmente se tienen las señales analógicas que vigilan la corriente pico y el alto voltaje del MPS.

Tabla N° 6.: Señales de control de un transmisor a magnetrón en su etapa de radiación.

Nombre de la señal	Descripción	Tipo de señal
TxSAPeakCurStat	Estado de las corrientes de carga de la tarjeta de conmutadores	0-24V
TxSAVoltStat	Estado de la tensión de carga de la tarjeta de conmutadores	0-24V
TxSATempStat	Estado de la temperatura de la tarjeta de conmutadores	0-24V
TxSAChargeCurStat	Estado de la corriente de carga de la tarjeta de conmutadores	0-24V
TxMpsHvStat	Estado actual de la fuente de alimentación principal en alto voltaje (MPS)	0-24V
TxMpsTempStat	Estado actual de la temperatura de la MPS	0-24V
TxDutyStat	Estado del ciclo de trabajo (el valor se mide por el valor de corriente RMS del pulso)	0-24V
TxWGArcStat	Estado actual del detector de arco en la guía de ondas	0-24V
TxTTUFault	Estado de falla del TTU	TTL
TxTTUGunArc	Estado del detector de arco del cañón TTU	TTL
TxTTUVswrStat	Estado del detector de la ROE del TTU	TTL
TxMagnetronTempStat	Estado de sobrecalentamiento del magnetrón	0-24V
TxMagnetronOvercurrent	Estado de la corriente del magnetrón	0-24V
TxMpsHvVal	Valor del alto voltaje de la MPS	Analógica 0-10 V
TxPeakCurVal	Valor de la corriente pico del transmisor	Analógica 0-10 V
TxTTUWgArcStat	Estado de detector de arcos en la guía de ondas del TTU	TTL

En la tabla N°7, se presentan las señales de comando que se controlan en el transmisor para que los respectivos equipos cumplan sus funciones primarias.

Tabla N° 7.: Comandos de control de un transmisor a magnetrón.

Nombre de la señal	Descripción	Tipo de señal
TxStandbyCmd	Comando de orden al transmisor para <i>Standby</i>	0-24V
TxFaultReset1	Comando para resetear fallas de las señales	0-24V
TxBlowerCmd	Comando de inicio de ventiladores	0-24V
TxTTUFaultReset	Señal de reposición (pulso) para la falla del TTU cuando está trabada.	TTL
TxTTUPulseSelectCmd	Selecciona entre el pulsos largo (LP) o corto (SP) para el generador integrado de PRF del TTU	TTL
TxBreakerCmd	Comando de encendido de breakers	0-24V
TxWGAirCmd	Comando de succión de aire de la guía de onda	0-24V
TxFilaBiasCmd	Comando de encendido de la fuente de filamento y de excitación	0-24V
TxMPSStandbyCmd	Comando de <i>Standby</i> para la MPS	0-24V
TxMpsHvCmd	Comando de alto voltaje de la MPS	0-24V
TxFaultReset2	Comando de reseteo de fallas de las señales	0-24V
TxCurControlCmd	Comando de control de corriente en el transmisor	0-24V
TxTriggerCmd	Comando de encendido de los disparos	0-24V

4.1.3. Algoritmo de control

A continuación se presenta el algoritmo de control diseñado para el encendido y radiación del transmisor a magnetrón.

En el siguiente diagrama se muestran las etapas a seguir durante el encendido y radiación del transmisor de radar, donde cada etapa representa un estado de funcionamiento del radar.

En primer lugar se tiene el transmisor del radar apagado, una vez enviado el comando de preparación del transmisor, se revisarán todas las señales que forman parte de la etapa de preparación, dicha etapa comprende los pasos 1, 2 y 3 del algoritmo propuesto a continuación, en caso de existir una falla en alguna de ellas el transmisor retorna al estado de apagado hasta que se indique de nuevo el comando de preparación.

Una vez superada la etapa de preparación se procede a dar el comando de encendido de las fuentes de filamento y premagnetización de manera de precalentar el magnetrón y transformador de pulsos del transmisor, dando comienzo a la etapa de precalentamiento, dicha etapa comprende desde el paso 4 hasta el paso 14 del algoritmo de control, en caso de existir alguna falla en las señales de los pasos anteriores hasta el paso 14 el proceso se detiene y se retorna al estado de apagado del transmisor hasta que se reinicie el proceso con el comando de preparación.

Por último se tiene la etapa de radiación que se inicia con el comando de alto voltaje de la MPS y que consta de los últimos 6 pasos del algoritmo, en esta etapa se verifican todas las señales del sistema, en caso de fallo de alguna se detiene el proceso como en las etapas anteriores, de no haber fallas y el proceso supere el paso 20 del algoritmo, el transmisor de radar se considera radiando y solo se detendrá con una orden explícita del sistema de control o con la aparición de alguna falla en cualquiera de las señales de control del sistema de transmisión.

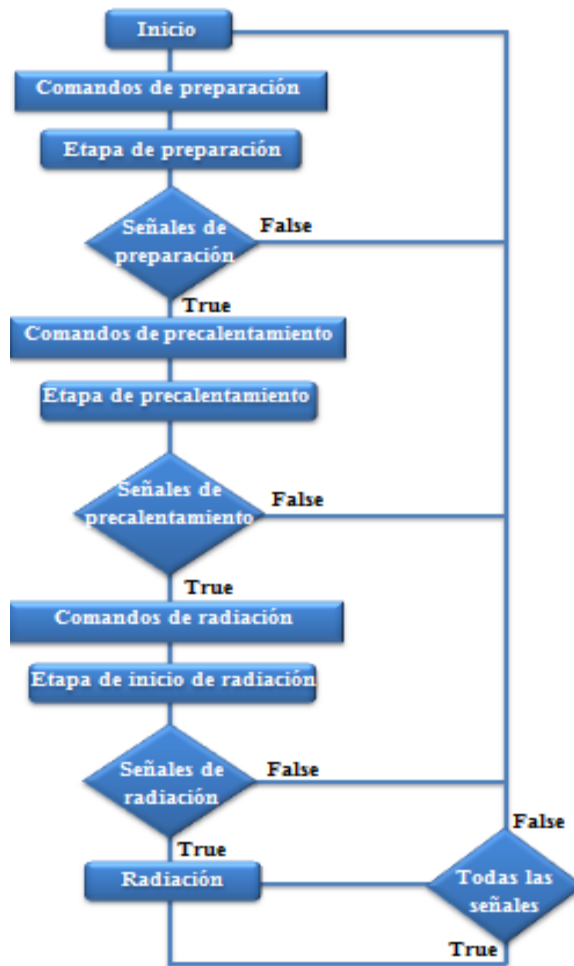


Figura N° 9.: Diagrama de flujo del algoritmo de control diseñado.

En la siguiente tabla se muestra el algoritmo de control del paso 01 de la etapa de preparación del magnetrón.

Tabla N° 8.: Paso 01, etapa de preparación, señales del gabinete.

	Señal	Tiempo (s)
Paso 01	1. TxStandbyCmd = Encendido	-
Transición 01	1.1. TxDoorIntStat ¿BIEN?	1,5
	1.2. TxEmergencyStat ¿BIEN?	
	1.3. TxFuseL123Stat ¿BIEN?	
	1.4. TxPhaseDetectionStat ¿BIEN?	

En la tabla N°8 se muestra el algoritmo de control para el paso 01, en donde primero se realiza la acción de encender el comando de orden al transmisor para *Standby*, luego en los próximos 1,5 segundos se revisan los puntos correspondientes al estado de la puerta del gabinete del magnetrón, el estado de la puerta frontal de la llave de emergencia, estado del fusible de las tres fases y el estado de la relación de las tres fases de la fuente de alimentación; una vez que estén bien dichos puntos, se pasa al siguiente paso, que se muestra en la siguiente tabla.

Tabla N° 9.: Paso 02, etapa de preparación, señales de fusibles.

	Señal	Tiempo (s)
Paso 02	2. TxBreakerCmd + TxBlowerCmd = Encendido	-
Transición 02	2.1. TxFuseF3Stat ¿BIEN?	1,5
	2.2. TxFuseF4Stat ¿BIEN?	
	2.3. TxFuseF5Stat ¿BIEN?	
	2.4. TxFuseF6Stat ¿BIEN?	
	2.5. TxFuseF7Stat ¿BIEN?	

En la tabla N° 9 se muestra el algoritmo de control correspondiente al paso 02, en donde se realiza simultáneamente la acción de encender el comando de encendido de breakers y el comando de inicio de ventiladores, para luego revisar en los próximos 1,5 segundos que los comandos correspondientes al estado del tercer fusible del ventilador del gabinete del magnetrón, y los estados de los fusibles de las fuentes de alimentación se encuentren funcionando correctamente, una vez que estén bien dichos puntos, se pasa al siguiente paso, que se muestra en la siguiente tabla.

Tabla N° 10.: Paso 03, etapa de preparación, señales de ventiladores.

	Señal	Tiempo (s)
Paso 03	3. Sin Operación	-
Transición 03	3.1. TxCabinBlower1Stat ¿BIEN?	60
	3.2. TxCabinBlower2Stat ¿BIEN?	
	3.3. TxCabinBlower3Stat ¿BIEN?	
	3.4. TxTubeBlowerStat ¿BIEN?	

En la tabla anterior, se muestra el algoritmo de control para el paso 03, en donde no se realiza ninguna operación inicialmente, si no que se pasa a la transición 03 por 60 segundos, tiempo en el cual los ventiladores se encienden y se verifica que los estados correspondientes al ventilador de la parte posterior del primero, segundo y tercer gabinete de modulador, y del ventilador del magnetrón estén funcionando correctamente y posteriormente se pasa al siguiente paso, que se muestra en la tabla N° 11.

Tabla N° 11.: Paso 04, etapa de precalentamiento, señales de fuentes de alimentación.

	Señal	Tiempo (s)
Paso 04	4. TxFilaBiasCmd = Encendido + TxFilaHours = Comienza	-
Transición 04	4.1. TxTrafoBiasStat ¿BIEN?	10
	4.2.1. TxPS5VDCStat ¿BIEN?	
	4.2.2. TxPS12VDC1Stat ¿BIEN?	
	4.2.3. TxPS12VDC2Stat ¿BIEN?	

En la tabla N°11 se muestra el algoritmo de control correspondiente al paso 04, en donde primero se realiza la acción de encender el comando de encendido de la

fuente de filamento y de excitación y simultáneamente comienza el proceso de *TxFilaHours* (contador de horas de funcionamiento de la fuente de filamentos), luego en los próximos 10 segundos se revisan que los puntos correspondientes a la transición 04, tales como el estado de la fuente de alimentación de la excitación del transformador de pulsos, estado de la fuente de alimentación de 5V, y estado de la primera y segunda fuente de alimentación de 12V, estén funcionando correctamente, una vez revisados dichos puntos, se pasa al siguiente paso, que se muestra en la siguiente tabla.

Tabla N° 12.: Paso 05, etapa de precalentamiento, reseteo de seguridad.

	Señal	Tiempo (s)
Paso 05	5. TxFaultReset1 + TxFaultReset2 = Encendido	-
Transición 05	5.1. Sin Operación	1,5

En la tabla N°12 se muestra el algoritmo de control para el paso 05, en donde primero se encienden simultáneamente los comandos 1 y 2 para resetear fallas de las señales, para luego tener 1,5 segundos en donde no hay operación, hasta que comience el paso 06, que se presenta en la siguiente tabla.

Tabla N° 13.: Paso 06, etapa de precalentamiento, reseteo de seguridad

	Señal	Tiempo (s)
Paso 06	6. TxFaultReset1 + TxFaultReset2 = Apagado	-
Transición 06	6.1. Sin Operación	2

En la tabla N°13 se muestra el algoritmo de control para el paso 06, en donde se apagan simultáneamente los comandos 1 y 2 para resetear fallas de las señales, para luego tener 2 segundos en donde no hay operación, hasta que comience el paso 07, que se presenta en la tabla N° 14.

El procedimiento que se lleva a cabo en el paso 05 y 06 se realiza para asegurar que ninguna señal este indicando una situación de alarma sin que esté ocurriendo realmente. Este proceso se repetirá antes de comenzar la radiación del transmisor en el paso 16 y 17.

Tabla N° 14.: Paso 07, etapa de precalentamiento, señales de la fuente de filamentos.

	Señal	Tiempo (s)
Paso 07	7. TxFilaVoltRef Rampa de 0V a Voltaje de referencia de 5s	-
Transición 07	7.1. TxFilaCurStat ¿BIEN?	5 (Rampa)
	7.2. TxFilaVoltVal ¿fuera de rango?	
	Low: 4.0V, High: 13.0V	

En la tabla N° 14 se tiene el algoritmo de control correspondiente al paso 07, en donde primeramente se le da un valor a *FilaVoltRef* (voltaje de referencia de filamento) para generar una rampa de 0V al voltaje de referencia indicado, dicha rampa se alcanza en 5 segundos, para luego hacer la verificación del estado de la corriente de filamentos y asegurar que el valor de voltaje de filamentos este entre los valores mínimos y máximos estipulados (4V mínimo y 13V máximo). Luego se sigue con el paso 08 que se representa en la siguiente tabla.

Tabla N° 15.: Paso 08, etapa de precalentamiento, inicio de temporizador de precalentamiento.

	Señal	Tiempo (s)
Paso 8	8. TxPreheatTimeStart = Encendido	-
Transición 8	8.1. Sin operación	1,5

En la tabla N° 15 se tiene el algoritmo de control correspondiente al paso 08, en donde se enciende un contador de tiempo de precalentamiento del transmisor, para

luego tener una transición de 1,5 segundos en donde no hay ninguna operación, hasta que se continua con el siguiente paso que se muestra en la tabla a continuación.

Tabla N° 16.: Paso 09, etapa de precalentamiento, señales de presurización de guía de ondas.

	Señal	Tiempo (s)
Paso 9	9. TxWGAirCmd = Encendido	-
Transición 9	9.1. TxWGAirStat ¿BIEN?	20

En la tabla N°16 se muestra el algoritmo de control para el paso 09, en donde se enciende el comando de succión de aire de la guía de ondas, para luego tener 20 segundos de transición en donde se verifica que esté funcionando correctamente el estado de la presión de aire en la guía de ondas, y posteriormente se sigue con el paso 10, que se presenta en la tabla N° 17.

Tabla N° 17.: Paso 10, etapa de precalentamiento, señales de la MPS.

	Señal	Tiempo (s)
Paso 10	10. TxMPSStandbyCmd = Encendido	-
Transición 10	10.1. TxMPSSStat ¿BIEN?	2

En la tabla anterior se muestra el algoritmo de control para el paso 10, en donde se enciende el comando de *Standby* para la MPS, para luego tener 2 segundos de transición en donde se verifica que esté funcionando correctamente el estado de la fuente de alimentación principal y posteriormente se sigue con el paso 11, que se presenta en la tabla N° 18.

Tabla N° 18.: Paso 11, etapa de precalentamiento, apagado del temporizador de precalentamiento.

	Señal	Tiempo (s)
Paso 11	11. Sin Operación	-
Transición 11	11.1. Preheating Time = Apagado	2

En la tabla anterior, se muestra el algoritmo de control para el paso 11, en donde no se realiza ninguna operación inicialmente, si no que se pasa a la transición 11 por 2 segundos, donde se apaga el tiempo de precalentamiento del transmisor, posteriormente se procede con el paso 12 que se representa en la siguiente tabla.

Tabla N° 19.: Paso 12, etapa de precalentamiento, señal de fuente de alimentación de TTU.

	Señal	Tiempo (s)
Paso 12	12. TxCurControlCmd + TxTriggerCmd = Encendido	-
Transición 12	12.1. TxPS16VDCStat ¿BIEN?	2

En la tabla N° 19 se tiene el algoritmo de control correspondiente al paso 12, en donde se encienden simultáneamente el comando de control de corriente en el transmisor y el comando de encendido de los disparos, para luego hacer la verificación durante 2 segundos del estado de la fuente de alimentación de 16V para la tarjeta de la matriz de conmutadores de control, luego se sigue con el paso 13 que se representa en la siguiente tabla.

Tabla N° 20.: Paso 13, etapa de precalentamiento, señales de estado del aceite del tanque.

	Señal	Tiempo (s)
Paso 13	13. Sin Operación	-
Transición 13	13.1. TxOilStat ¿BIEN?	2
	13.2. TxOilTempStat ¿BIEN?	

En la tabla anterior, se muestra el algoritmo de control para el paso 13, en donde no se realiza ninguna operación inicialmente, si no que se pasa a la transición 13 por 2 segundos, para hacer la verificación del estado del indicador de nivel de aceite del tanque y de temperatura de aceite. A continuación se tiene el paso 14 que se representa en la tabla N° 21.

Tabla N° 21.: Paso 14, etapa de precalentamiento, sistema listo para iniciar radiación.

	Señal	Tiempo (s)
Paso 14	14. TxStandbyStatindicate + TxMpsHvCmd = Apagado	-
Transición 14	14.1. Sin Operación	1,5

En la tabla N° 21 se tiene el algoritmo de control correspondiente al paso 14, en donde se hace simultáneamente el encendido del estado del *Standby* del transmisor, y apagado del comando de alto voltaje de la MPS (esto se realiza solo por seguridad, ya que debería estar apagado), para luego tener 1,5 segundos de transición en donde no hay operación, hasta que comience el paso 15, que se presenta en la tabla N° 22.

Tabla N° 22.: Paso 15, etapa de radiación, inicio de la etapa de radiación.

	Señal	Tiempo (s)
Paso 15	15. Sin Operación	-
Transición 15	15.1. Sin Operación	1,5

En la tabla anterior se tiene el algoritmo de control correspondiente al paso 15, en donde no se realiza ninguna operación inicialmente, si no que se pasa a la transición 15 por 1,5 segundos en donde no se realiza ninguna operación, este paso representa el punto donde se considera que el transmisor comienza el proceso de

radiación a la atmosfera, posteriormente se pasa al paso 16 que se representa en la siguiente tabla.

Tabla N° 23.: Paso 16, etapa de radiación, reseteo de seguridad.

	Señal	Tiempo (s)
Paso 16	16. TxFaultReset1 + TxFaultReset2 = Encendido	-
Transición 16	16.1. Sin Operación	1,5

En la tabla N° 23 se tiene el algoritmo de control correspondiente al paso 16, en donde se encienden simultáneamente los comando 1 y 2 para resetear fallas de las señales y posteriormente se tiene una transición de 1,5 segundos en donde no hay operación, hasta que se llega al paso 17 que se representa en la tabla N° 24.

Tabla N° 24.: Paso 17, etapa de radiación, reseteo de seguridad.

	Señal	Tiempo (s)
Paso 17	17. TxFaultReset1 + TxFaultReset2 = Apagado	-
Transición 17	17.1. Sin Operación	2,1

En la tabla N° 24 se tiene el algoritmo de control correspondiente al paso 17, en donde se apagan simultáneamente los comando 1 y 2 para resetear fallas de las señales y posteriormente se tiene una transición de 2,1 segundos en donde no hay operación, hasta que se procede con el paso 18 que se representa en la tabla N° 25.

Tabla N° 25.: Paso 18, etapa de radiación, reseteo de seguridad TTU.

	Señal	Tiempo (s)
Paso 18	18. TxTtuFaultReset = Encendido	-
Transición 18	18.1. Sin Operación	1,5

En la tabla N° 25 se tiene el algoritmo de control correspondiente al paso 18, en donde se enciende la señal de reposición (pulso) para la falla del TTU cuando está trabada. Luego se tiene una transición de 1,5 segundos en donde no hay operación, luego se sigue con el paso 19 que se representa en la tabla N° 26.

En el paso 18 se realiza un procedimiento semejante al del paso 05 y 06 o del paso 16 y 17, pero para las señales del TTU, como medida de seguridad.

Tabla N° 26.: Paso 19, etapa de radiación.

	Señal	Tiempo (s)
Paso 19	19. TxTtuFaultReset = Apagado + TxMpsHvCmd = Encendido, TxMpsHvRef (Rampa de 0V a Voltaje de referencia de 5s)	-
Transición 19	19.1. TxSaChargeCurStat ¿BIEN?	1,5
	19.2. TxSaPeakCurStat ¿BIEN? ¡Lógica negativa!	
	19.3. TxSaTempStat ¿BIEN?	
	19.4. TxMpsTempStat ¿BIEN?	
	19.5. TxMpsHvStat ¿BIEN?	
	19.6. TxDutyStat ¿BIEN?	
	19.7. TxWGArcStat ¿BIEN?	
	19.8 TxMagnetronTempStat	
	19.10. TxTTUGunArcStat ¿BIEN?	
	19.11. TxTTUVswrStat ¿BIEN?	
	19.12. TxTTUWgArcStat ¿BIEN?	

En la tabla N° 26 se tiene el algoritmo de control correspondiente al paso 19, en donde simultáneamente se apaga la señal de reposición para la falla del TTU y se enciende el comando de alto voltaje de la MPS, indicándole además un valor de alto voltaje de referencia; luego se tiene una transición de 1,5 segundos en donde se verifica que estén funcionando correctamente los comandos de estado de la corriente

de carga de la fuente de alimentación principal, estado de la temperatura y estado de las corrientes de carga de la tarjeta de conmutadores, estado de la temperatura de la MPS, estado de la fuente de alimentación principal en alto voltaje (MPS), estado del ciclo de trabajo, estado del detector de arco de la guía de ondas, estado de sobrecalentamiento del magnetrón, estado del detector de arco del cañón y el estado del detector de arco de la guía de ondas TTU y el estado del detector de la ROE del TTU, y finalmente se procede al paso 20 que se representa en la tabla N° 27.

Tabla N° 27.: Paso 20, etapa de radiación, señales de corriente y voltaje de radiación.

	Señal	Tiempo (s)
Paso 20	20. Sin Operación	-
Transición 20	20.1. TxSaVoltStat ¿BIEN?	5 (Rampa)
	20.2. TxMagnetronOvercurrent	
	20.3. TxMpsHvVal ¿fuera de rango? Low: 0.0V, High: 830.0V, Calibration Value: 100.0	
	20.4. TxPeakCurVal ¿fuera de rango? Low: 0.0A, High: 45.0A, Calibration Value: 10.00	

En la tabla anterior se tiene el algoritmo de control correspondiente al paso 20, en donde no se realiza ninguna operación inicialmente, si no que se pasa a la transición 20 por 5 segundos en donde se realiza la rampa del alto voltaje del MPS hasta el valor de referencia indicado en el paso 19, y se verifica que estén funcionando correctamente los comandos correspondientes al estado de la tensión de carga de la tarjeta de conmutadores, estado de la corriente del magnetrón, valor del alto voltaje de la MPS (verificando que ésta señal se encuentre dentro del rango de los valores máximo (830.0V) y mínimo (0V)), y por último el valor de la corriente pico del transmisor (verificando que ésta señal se encuentre dentro del rango de los valores máximo (45.0V) y mínimo (0V)).

Luego de este último paso, se considera que el transmisor está radiando a la atmosfera, y entra en un ciclo donde se revisan cada una de las señales de control para verificar el funcionamiento correcto del radar, en caso de presentarse alguna falla en cualquiera de las señales, el transmisor detendrá la radiación y se volverá a iniciar el proceso desde el paso 01 (esto también se aplica a cualquier fallo en las transiciones de los pasos mostrados anteriormente).

4.1.4. Selección del protocolo de comunicaciones

Para la comunicación de todos los equipos del transmisor se utiliza actualmente el protocolo Profibus. Fue elegido en su momento porque es el bus de campo de prestaciones más eficientes en el mercado, para el diseño planteado, el cambio de tecnología a Ethernet, a Modbus o cualquier otro bus de campo no es viable, ya que implicaría el cambio de equipos previamente comprados para el uso de Profibus.

El acoplador Profibus a utilizar es el 750-600, marca WAGO, este acoplador es capaz de soportar todos los colectores de los módulos y transferir automáticamente los datos mezclados de los módulos de entrada/salida a la imagen del proceso. El dato de proceso puede ser enviado a través del Profibus al TXCU, y recibido desde el campo por la misma vía.

Para las señales de entrada de 24V se utiliza el módulo 750-403, marca WAGO.

Para las señales de salida de 24V se utiliza el módulo 750-504, marca WAGO.

La entrada digital de TTL se realiza con el módulo 750-414, marca WAGO, al igual que el módulo de 24V, consta de un filtro superior de ruidos.

Para las salidas digitales TTL se utiliza el módulo 750-519, marca WAGO.

Para las entradas de señales analógicas entre 0-10VDC, se utiliza el módulo 750-468, y para las salidas analógicas entre 0-10VDC se utiliza el módulo 750-550, ambos marca WAGO.

Finalmente para la alimentación del acoplador y resto de módulos de entradas y salidas, se tiene el módulo de alimentación 750-612, marca WAGO, que provee la corriente a todos los módulos a través de los rieles de contacto.

Las hojas de datos técnicos de cada uno de estos módulos se encuentran en la sección de Anexos.

4.1.5. Selección del controlador

El controlador a utilizar será un computador industrial, con un sistema operativo Linux. Esta decisión se toma debido a dos razones importantes:

La primera es que el uso de un PLC para el control de tal cantidad de señales, con la programación estructurada que requiere el algoritmo, es de mayor complejidad e incrementa el costo del diseño al tener que comprar un equipo nuevo más todos los módulos necesarios para manejar las señales.

La segunda es que cada radar ya cuenta con un computador industrial, por lo tanto la elección presenta un ahorro económico.

Por lo tanto el computador industrial se presenta como el controlador ideal para el diseño del sistema de supervisión y control.

4.1.6. Selección del software de programación del Sistema de Supervisión y Control y del software para la realización de la interfaz hombre-máquina

Ya que el controlador a usar será un computador industrial, los programas a utilizar podrían ser pagos o de licencias libres, al tener la limitación de no poseer ninguna licencia paga en el INAMEH para el desarrollo de sistemas de control y supervisión con lenguajes estructurados de computación o de desarrollo de interfaces

visuales, se estudiaron las posibilidades que el sistema Linux tiene para ofrecer en desarrollos de programación, donde se consiguieron muchas aplicaciones que permiten programar en numerosos lenguajes, la mayoría están desarrolladas para la programación estructurada de C++, C y Java, por lo que se decidió para este diseño hacer uso del programa de licencia libre Qt Creator de Nokia, que permite la interacción de dos lenguajes de programación muy poderosos como son el C++ y el QML (lenguaje de programación basado en JavaScript, pero optimizado para la programación de objetos visuales), con este programa es posible implementar el algoritmo de control en el lenguaje C++ y realizar la interfaz hombre-máquina en QML, además permite de manera fácil e intuitiva la interacción entre ambos lenguajes, creando un programa visualmente atractivo y al mismo tiempo rápido y efectivo, que es lo que se requiere en controles de sistemas sofisticados.

4.1.7. Programación del Sistema de Supervisión y Control

La programación se realizó en primera instancia en el lenguaje C++ para las pruebas iniciales del algoritmo y para obtener la optimización en tiempo del programa.

El programa de supervisión y control escrito en C++ consta de 5 archivos con los que el compilador construye el programa ejecutable, estos archivos son el *Main.cpp*, donde se ejecutan las acciones principales y se llaman a las funciones, el *TXCU.h*, en donde se inicializan todas las variables y funciones que se utilizarán en el programa, el *Set_get.h*, donde están todas las funciones para modificar y obtener las variables privadas inicializadas en el *TXCU.h*, el archivo *Funciones.h*, que se encarga de las funciones de control a ejecutar por el programa y finalmente el archivo *Warning.h*, que contiene todas las funciones que verifican cual señal genera error y avisa al usuario.

- TXCU.h: Consta de las inclusiones de librerías a utilizar por el programa y una clase “TX”, que incluye todas las señales de control a utilizar en el algoritmo,

estas variables se crearon de forma privada, para evitar el cambio de sus valores, a menos que se utilicen unas funciones especiales para cambiar el valor, de esta manera se evita que se modifiquen los valores por error, dichas funciones son inicializadas al igual que las funciones que son capaces de obtener los valores de las variables privadas.

- Set_get.h: Los cuerpos de las funciones de obtención de variables privadas y las funciones para modificarlas están en este archivo, las funciones de *set* se encargan de verificar si el valor nuevo a colocar en la variable es distinto, de ser distinto se cambia por el nuevo valor, en caso de que el valor a colocar en la variable es el mismo que tiene se deja igual, también tenemos las funciones *get* que se encargan de obtener el valor y utilizarlo en la función donde se esté llamando.
- Funciones.h: En este archivo se tienen las diferentes funciones para cada paso del algoritmo, cada paso cuenta con 3 fases, primero la inicialización o desactivación de alguna señal, segundo la espera para dar tiempo a los instrumentos de actuar, y finalmente la revisión de distintas señales para saber si están activadas o no y actuar de manera consecuente al algoritmo planteado, si alguna señal que debería estar activada no lo está, se hace el llamado a las funciones de alarma, de estar todo correctamente, se llama a la función que represente el siguiente paso en el algoritmo de control.
- Warning.h: En este encabezado encontramos las funciones encargadas de las señales de alarma, cuando en algún paso de *Funcion.h* se consigue un error, es llamada una función que actuará de forma consecuente dependiendo del paso en el que se encuentre el algoritmo, al encontrar un error se envía una señal de comando para el apagado de todos los equipos del transmisor, volviendo a la espera de inicialización, además se verifican las señales que hasta ese punto debían estar activadas, una por una, para luego avisar cuales señales presentaron avería, para que el técnico de radar pueda tener una idea de donde se presentó el error, pero no se revisan las señales de equipos que aún no estén encendidos, ya que podrían o no estar

activadas y no ser un error, por esto se actúa dependiendo del paso en el que se encuentre el proceso de encendido del transmisor.

- Tiempo de espera: La medición del tiempo de espera se realiza con la librería *boostchrono*, que permite una medición del tiempo con una precisión de nanosegundos, por lo tanto se asegura que el sistema actúe exactamente cuándo se espera. Esta medición del tiempo en nanosegundos se tuvo que retirar para el programa final con interfaz hombre-máquina realizada en QML, ya que al realizar este proceso en C++, la interfaz visual debía esperar a que la función de medición de tiempo terminara para volver a activarse la interfaz visual, por lo tanto se utilizaron los temporizadores de QML, que tienen una precisión de milisegundos, siendo no tan preciso, pero lo suficiente para los tiempos de espera del programa.

4.1.8. Interfaz hombre-máquina

La programación de la interfaz hombre-máquina se realizó en el Qt Creator 5.0, esto permite un lenguaje de programación híbrido, con archivos con código C++ y archivos con código QML, el programa consta de muchos archivos que permiten la compilación de estos diferentes lenguajes de programación, pero principalmente son cinco archivos los que contienen la parte visual del programa y el código de control del proceso.

Para el control y supervisión del proceso, se tienen los mismos archivos del C++, con unas ligeras modificaciones para funcionar en conjunto al código QML.

Primero el *TXCU.h*, donde de nuevo se tiene la inicialización de las variables y las funciones a utilizar, pero incluyendo la propiedad de la clase *QObject* que permite conectar el código C++ y ser visto y modificado por el código QML, también se creó propiedades para cada variable que se utiliza en el control, para poder modificar, obtener y notificar al código QML si hay cambios en estas variables, ya que dicho código no es lineal, sino que ocurre todo al mismo tiempo, no sería posible por ejemplo mostrar en pantalla que alguna variable cambió en algún momento si no

se le notifica por medio de una señal QML al código, para que haga los cambios que debe hacer. La otra diferencia entre el código original de C++ y este nuevo código C++ especial para enlazarse con QML, es la existencia de señales, ranuras y funciones *Q_invokable*. Las ranuras y funciones *Q_invokable* son básicamente lo mismo, y es simplemente un permiso al código QML de poder invocar o llamar una función escrita en C++, con la particularidad de poder interconectar previamente señales y ranuras para que en el caso de emitirse una señal, se realicen inmediatamente las funciones conectadas a esta señal, como una interrupción, de esta manera se pueden manejar distintas interrupciones que ocurran y la parte visual, sea capaz de mantenerse actualizada a los cambios ocurridos en el programa e ir invocando las funciones dependiendo de lo que va ocurriendo.

El *Set_Get.cpp* tiene las mismas funciones que el *Set_get.h* del código únicamente C++, con la diferencia de que se emite una señal en cada función cada vez que se realiza un cambio en una variable, de esta manera el código QML es notificado del cambio ocurrido y actúa consecuentemente con las funciones unidas a estas señales.

El código *Funciones.cpp*, es muy parecido a la función *Funciones.h*, pero con la variación de las señales que se emiten, en este caso en vez de llamar directamente al siguiente paso del proceso, se emite una señal que lee QML y realiza los pasos para continuar, ahora las activaciones de los comandos y el tiempo de espera se realizan en el código QML, por lo tanto, solo se revisan paso a paso las señales de control que deben activarse en las transiciones del algoritmo, en caso de no activarse correctamente se emite una señal de error que lee el código QML.

El archivo *Main.cpp*, es totalmente distinto al del código C++ anterior, ya que este se encarga de generar la parte visual y de interconectar el código C++ y el código QML.

El código *IO.cpp*, contiene las funciones que se encargan de obtener las variaciones de las señales que se encuentran en un archivo externo, además de las

funciones que se encargan de guardar el registro histórico de los cambios en las señales y el registro de la actividad del programa en el encendido y radiación del transmisor.

Finalmente el código QML encargado de la parte visual, consta de un solo archivo que es el *Main.qml*, en este se genera toda la interfaz hombre-máquina y se controlan las conexiones de señales y funciones.

Este código se divide en tres partes importantes, primero la visual, donde están los botones y sus funciones respectivas, las áreas de texto donde se muestra independientemente la información de cada señal y el área de texto donde en tiempo real el programa nos va informando del estado del transmisor, errores, o mostrando en el paso que se encuentra del encendido del transmisor.

En segundo lugar se tiene el código que se encarga de conectar las señales con las ranuras y los temporizadores utilizados, para medir los tiempos de espera de cada paso del control, en esta sección de código se realizan muchas instrucciones que antes se hacían en el *Funciones.h* del código de C++, pero por razones de operación de la interfaz visual, se tuvo que rehacer de esta forma, ya que la interfaz visual se detenía mientras corría el código C++, y el código temporizador usado anteriormente se realizaba con un bucle que medía el tiempo, este bucle en C++ no permitía volver al código QML hasta terminarse, por lo tanto una vez empezado el ciclo, la interfaz hombre-máquina se paralizaba hasta el fin del proceso, y esta no era la idea, por tanto se utilizaron los temporizadores de QML que son más apropiados.

La tercera parte es el código de errores, que antes realizaba *warning.h*, estas instrucciones también se movieron al código QML para mayor velocidad de acción del proceso, ya que en caso de haber un error, se emite una señal en C++ y el QML reacciona interrumpiendo el proceso y realizando la función conectada a la señal, de esta manera es más rápido.

En la figura N° 10 a continuación, se presenta la interfaz hombre-máquina diseñada, que está conformada por tres áreas importantes.

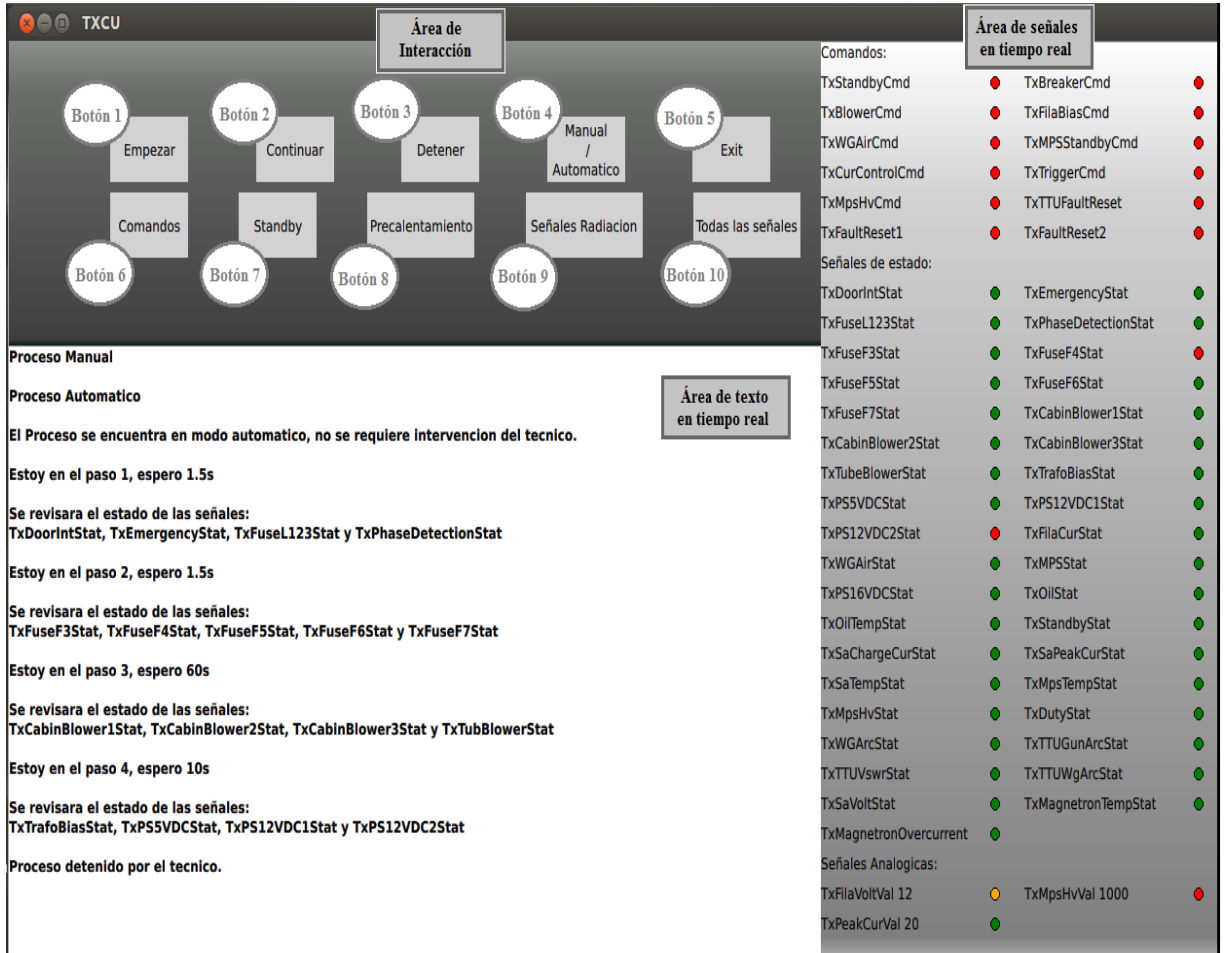


Figura N° 10.: Interfaz Hombre-Máquina.

- 1) Área de interacción, donde tenemos 10 botones con los que se puede modificar la presentación de las señales en tiempo real, y otros botones con los que se controla el proceso de encendido del transmisor.
 - Botón 1: Botón para iniciar el proceso de encendido del radar, en caso de ya estar iniciado el proceso al presionar el botón se le indicará al técnico de radar que el proceso ya está en marcha.
 - Botón 2: Botón de continuar, solo se utiliza en caso de que el control esté en modo manual, cada vez que sea requerido por el sistema, le será indicado al técnico la

necesidad de presionar el botón para continuar con el proceso, esto ocurre dos veces en el proceso de encendido del radar (para iniciar el precalentamiento del radar y para iniciar la radiación del radar), en caso de presionar el botón en un momento inoportuno, en el área de texto en tiempo real se le indicará al técnico por qué no funciona el botón en el momento, por ejemplo, cuando el proceso esta automático.

- Botón 3: Este botón detiene el proceso en marcha, enviando todos los comandos de apagado a los equipos y asegurándose que el proceso se detiene de forma correcta.
- Botón 4: Cambia el modo de funcionamiento del control, del modo automático al modo manual y viceversa, este cambio solo podrá ser realizado cuando el proceso está detenido, en caso de que el proceso ya esté en marcha se le indicará al técnico del radar que tiene que detener el proceso para cambiar de modo.
- Botón 5: Botón de salida del programa, cabe destacar que el programa no será capaz de cerrarse en caso de que el radar se encuentre en el proceso de encendido del transmisor o en el proceso de radiación, por lo tanto será necesario primero detener el proceso. Cada vez que se cierre la aplicación se emitirá el registro de actividades que se realizaron mientras el programa estuvo abierto.
- Botón 6: Botón para mostrar en el área de señales en tiempo real solo las señales de comando.
- Botón 7: Botón para mostrar en el área de señales en tiempo real solo las señales de *Standby* del transmisor.
- Botón 8: Botón para mostrar en el área de señales en tiempo real solo las señales de precalentamiento del transmisor.
- Botón 9: Botón para mostrar en el área de señales en tiempo real solo las señales de radiación del transmisor.
- Botón 10: Botón para mostrar en el área de señales en tiempo real todas las señales del transmisor, esta es la vista predeterminada al encender el programa.

- 2) Área de señales en tiempo real, donde se presentan cada una de las señales con un símbolo al lado, que de manera intuitiva señala en color verde las señales que se encuentran correctamente, en color rojo las señales que se encuentran apagadas, y en color amarillo las señales analógicas que se encuentran en el rango del 10% cerca de los límites máximos o mínimos permitidos.
- 3) Área de texto en tiempo real, aquí se presenta cada uno de los pasos que se realizan en el proceso de encendido del transmisor, y qué señales se están verificando en el momento, además de indicar al técnico de radar si el proceso está en modo automático o en modo manual, o avisar en caso de que se esté realizando una operación no permitida en el momento (por ejemplo, intentar apagar el programa mientras se está radiando o en medio del proceso de encendido del transmisor).

CAPITULO V

5. RESULTADOS

5.1. Simulación

La simulación se realizó creando ciertos patrones de comportamiento usual del transmisor de radar, modificando el archivo que maneja los valores de las señales, para observar el comportamiento del programa frente a las diferentes situaciones de falla.

En la siguiente figura se muestra el diagrama de flujo de la información entre el sistema de transmisión y la PC industrial.

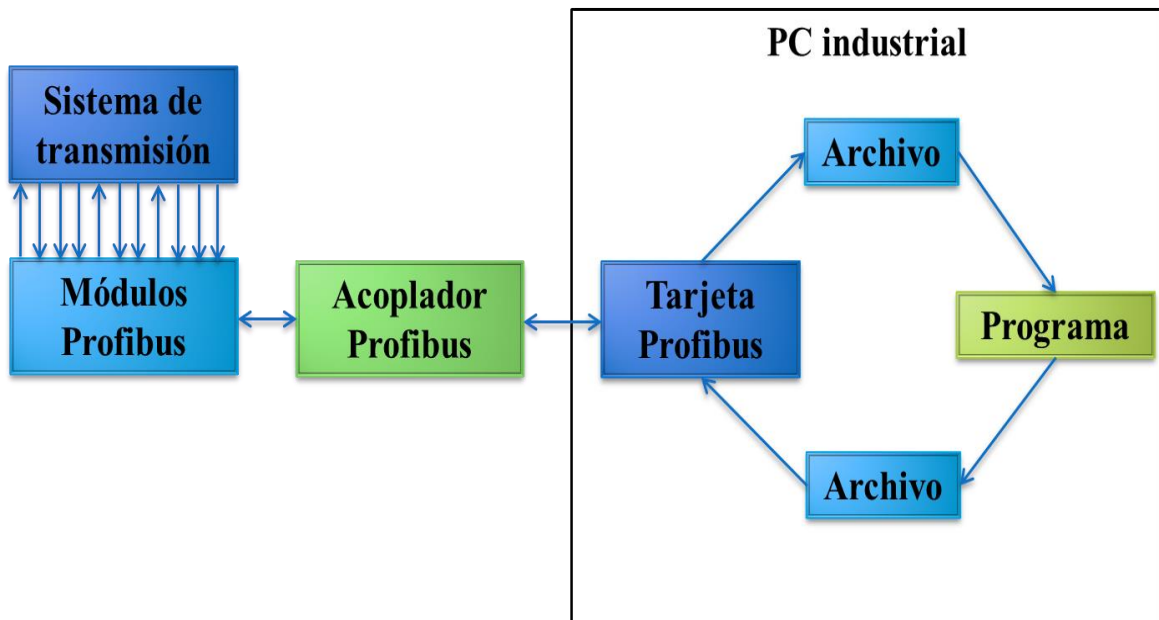


Figura N° 11.: Diagrama de flujo de la información entre el sistema de transmisión y la PC industrial.

El flujo de información entre la PC industrial y el sistema de transmisión será a través de la red Profibus, pasando por los módulos y el acoplador hasta la tarjeta Profibus, esta tarjeta genera un archivo en la PC industrial con los datos de todas las señales del transmisor, el SCADA programado lee este archivo y actúa dependiendo de la situación que se esté presentando.

El programa ante cada error presentado, advirtió al técnico del radar sobre la situación ocurrida, mostrando cuáles señales presentaban fallas y más importante aún, enviando los comandos apropiados para apagar el radar y evitar averías graves de los equipos del sistema.

Luego de apagar el programa, se presenta el registro de actividades que se realizó mientras el programa estuvo encendido, mostrando fallas presentadas y cada paso del proceso de encendido del radar. Además se tiene el registro histórico de cambios de las señales donde podemos observar exactamente en qué momento del día se presentó cuál falla.

5.1.1. Casos particulares

A continuación se presentan casos particulares de la simulación mostrando diferentes situaciones y el comportamiento del controlador frente a estos casos.

- **Caso 1**

El primer caso presentado es la situación donde no se presentan fallas, todas las señales muestran que el sistema está bien, en la figura N° 12 observamos como en el área de texto en tiempo real, se van mostrando los mensajes de la actividad que está realizando el proceso, cuánto tiempo llevará la etapa y que señales se verificarán, en este caso particular el proceso está automático, por lo tanto en los puntos donde se requería la participación del técnico de radar, el programa continuó automáticamente.

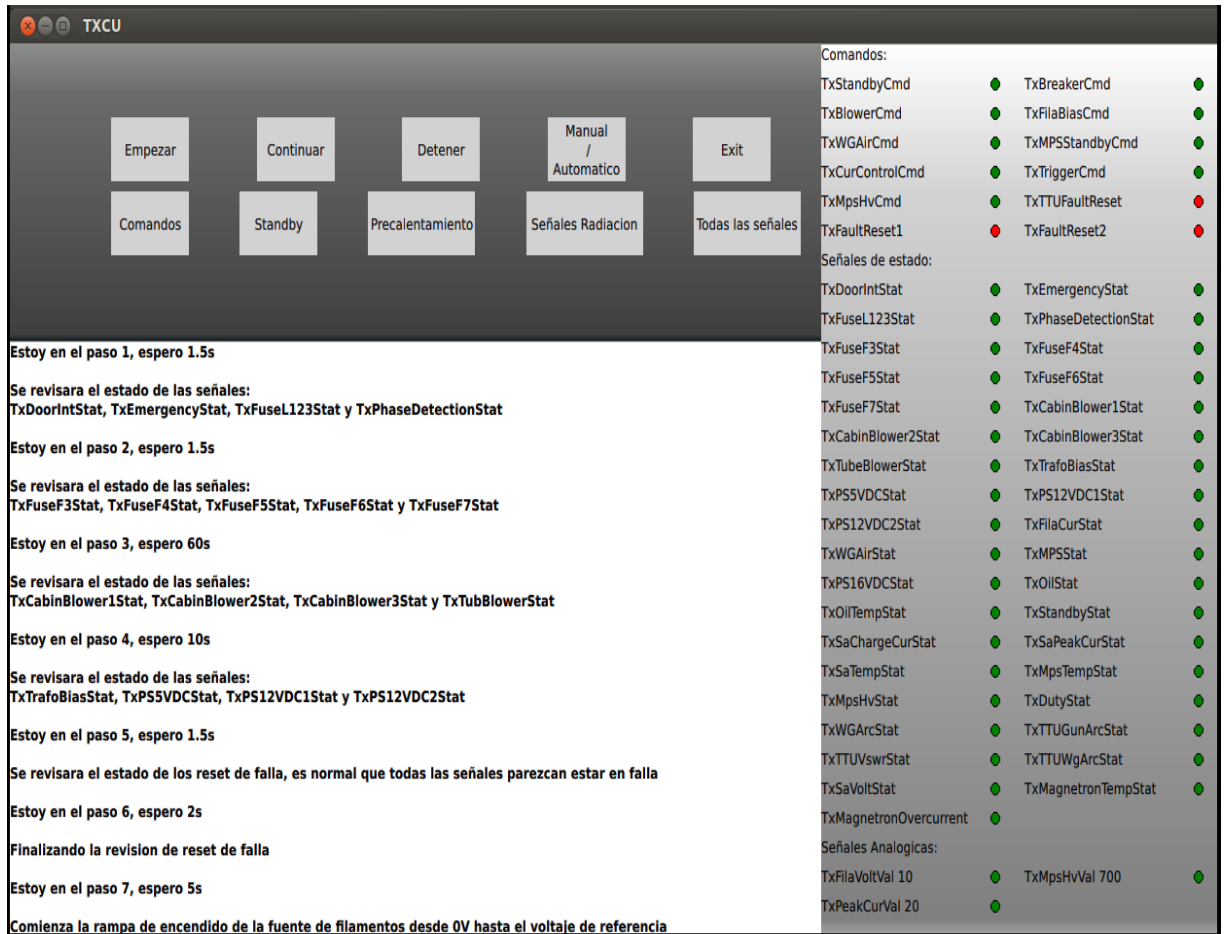


Figura N° 12.: Simulación del sistema (todas las señales funcionando correctamente

1).

Empezar Continuar Detener Manual / Automatico Exit

Comandos Standby Pre calentamiento Señales Radiacion Todas las señales

Comandos:

TxStandbyCmd	●	TxBreakerCmd	●
TxBlowerCmd	●	TxFilaBiasCmd	●
TxWGAIrCmd	●	TxMPSStandbyCmd	●
TxCurControlCmd	●	TxTriggerCmd	●
TxMpsHvCmd	●	TxTTUFaultReset	●
TxFaultReset1	●	TxFaultReset2	●

Señales de estado:

TxDoorIntStat	●	TxEmergencyStat	●
TxFuseL123Stat	●	TxPhaseDetectionStat	●
TxFuseF3Stat	●	TxFuseF4Stat	●
TxFuseF5Stat	●	TxFuseF6Stat	●
TxFuseF7Stat	●	TxCabinBlower1Stat	●
TxCabinBlower2Stat	●	TxCabinBlower3Stat	●
TxTubeBlowerStat	●	TxTrafoBiasStat	●
TxPS5VDCStat	●	TxPS12VDC1Stat	●
TxPS12VDC2Stat	●	TxFilaCurStat	●
TxWGAIrStat	●	TxMPSStat	●
TxPS16VDCStat	●	TxOilStat	●
TxOilTempStat	●	TxStandbyStat	●
TxSaChargeCurStat	●	TxSaPeakCurStat	●
TxSaTempStat	●	TxMpsTempStat	●
TxMpsHvStat	●	TxDutyStat	●
TxWGArcStat	●	TxTTUGunArcStat	●
TxTTUswrStat	●	TxTTUWgArcStat	●
TxSaVoltStat	●	TxMagnetronTempStat	●
TxMagnetronOvercurrent	●		

Señales Analógicas:

TxFilaVoltVal 10	●	TxMpsHvVal 700	●
TxPeakCurVal 20	●		

Estoy en el paso 7, espero 5s

Comienza la rampa de encendido de la fuente de filamentos desde 0V hasta el voltaje de referencia
Se revisaran la señal de TxFilaCurStat y que TxFilaVoltVal se encuentre entre los valores aceptables

Estoy en el paso 8, espero 1.5s

Se encendera el contador de tiempo de funcionamiento de la fuente de filamentos

Estoy en el paso 9, espero 20s

Se revisara el estado de la señal TxWGAIrCmd

Estoy en el paso 10, espero 2s

Se revisara el estado de la señal TxMPSStandbyCmd

Estoy en el paso 11, espero 2s

Estoy en el paso 12, espero 2s

Se revisara el estado de la señal TxPS16VDCStat

Estoy en el paso 13, espero 2s

Se revisaran los estados de las señales TxOilStat y TxOilTempStat

Estoy en el paso 14, espero 1.5s

El transmisor esta correctamente en standby

Figura N° 13.: Simulación del sistema (todas las señales funcionando correctamente 2).

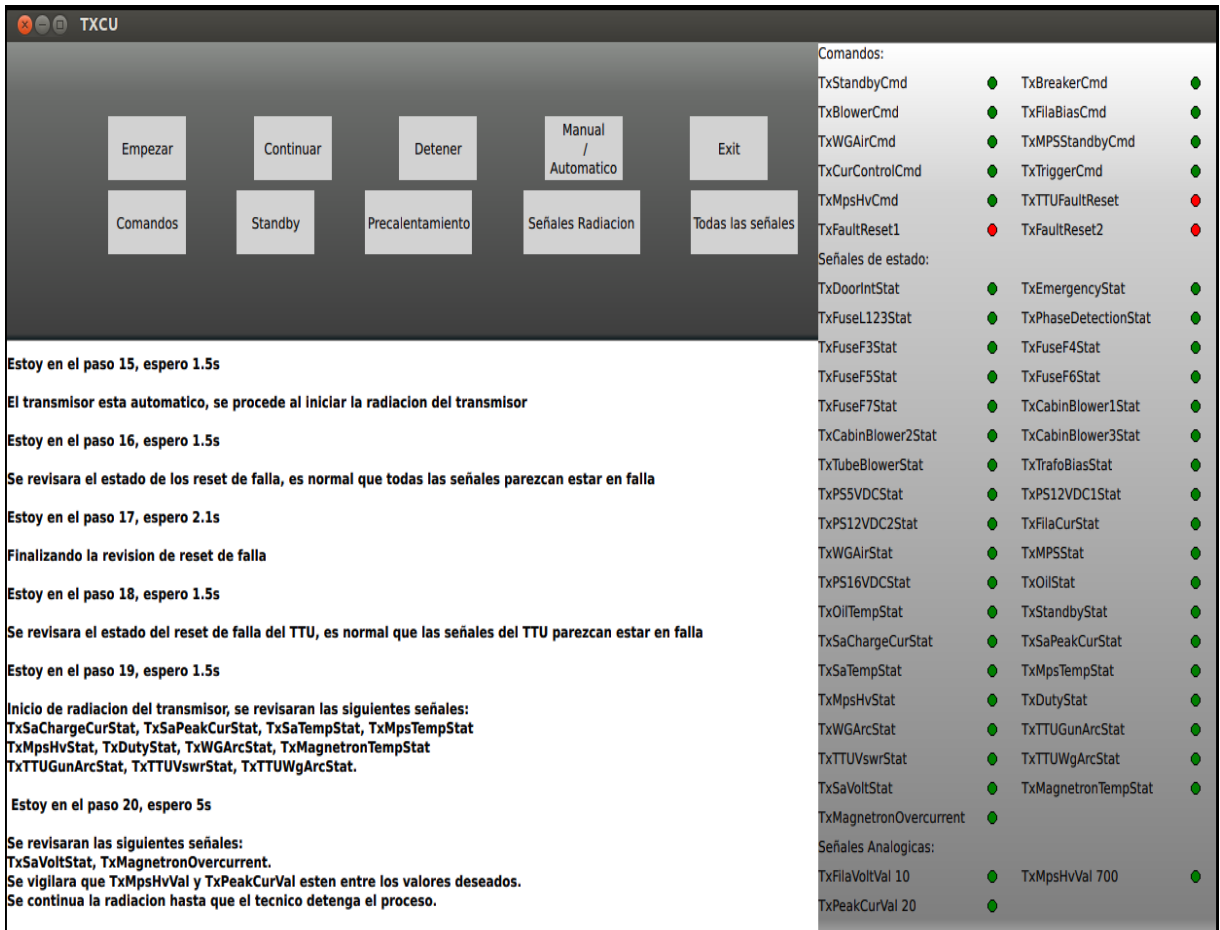


Figura N° 14.: Simulación del sistema (todas las señales funcionando correctamente 3).

En las figuras N° 13 y N° 14 observamos cómo el proceso continua sin retrasos ni fallas, y el radar continua con la radiación hasta que el técnico le indique que el proceso se detenga, o se presente alguna falla en el sistema mientras el proceso de radiación está activo (este caso se estudiará más adelante).

- **Caso 2:**

Uno de los casos de falla más comunes en los radares es cuando se deja la compuerta del gabinete del transmisor abierta, en la figura N° 15 observamos como el programa inicia el proceso de encendido y en el primer paso indica al técnico que la

puerta presenta una falla, obviamente la falla puede deberse a muchas razones, por ejemplo, la más común es que la puerta este abierta, pero también podría ser el caso de falla en el sensor de la puerta o falla en alguno de los cables que llevan la señal.

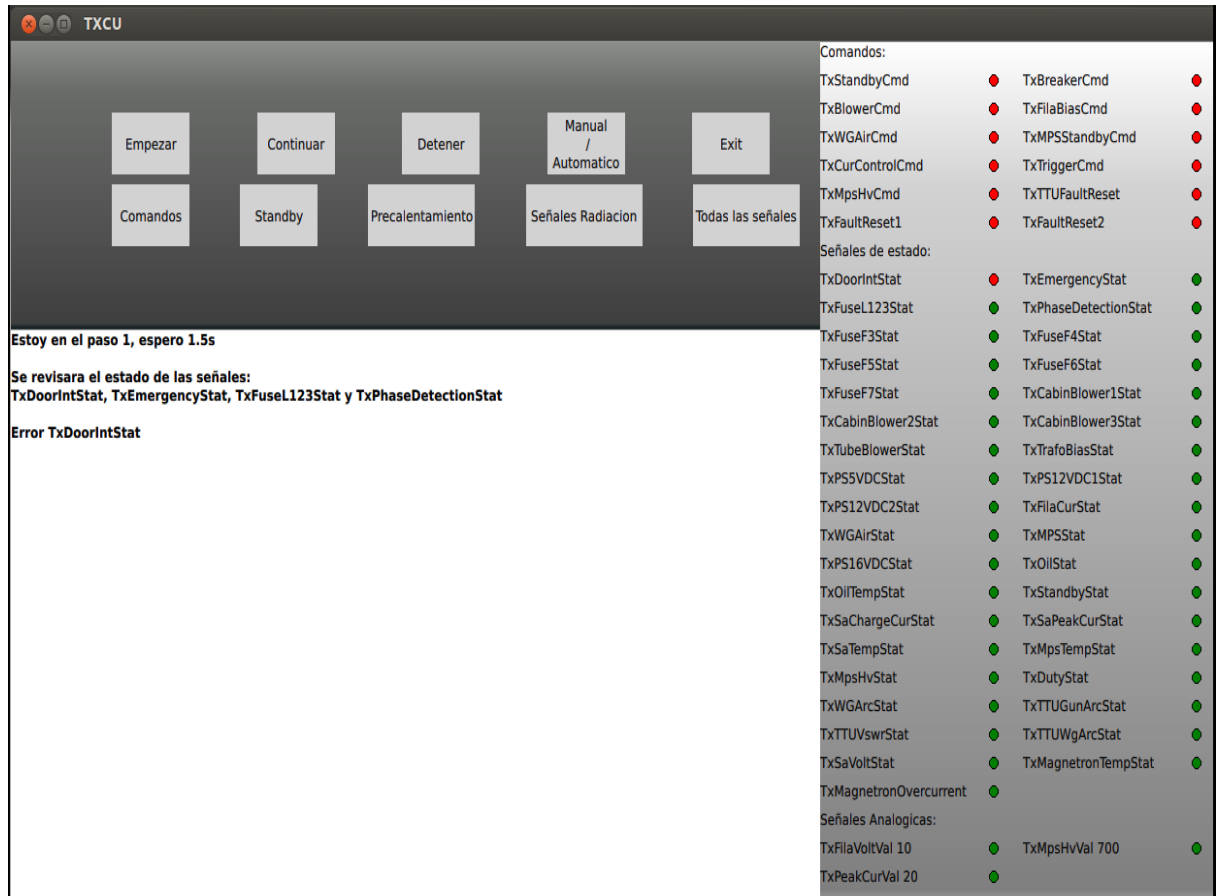


Figura N° 15.: Simulación del sistema (falla de puerta).

- Caso 3:

El tercer caso es un caso hipotético en el que los 3 ventiladores del gabinete fallan al encenderse, en la figura N° 16 se observa, cómo se le indica al técnico, en el área de texto en tiempo real, de las 3 fallas y se detiene el proceso de encendido (nótese como todas las señales de comando están apagadas indicando que el sistema esta desactivado en el momento), fallas como ésta no son comunes (que fallen 3

ventiladores al mismo tiempo es improbable), y puede deberse más a fallas de alguna fuente de alimentación o fallas de comunicación.

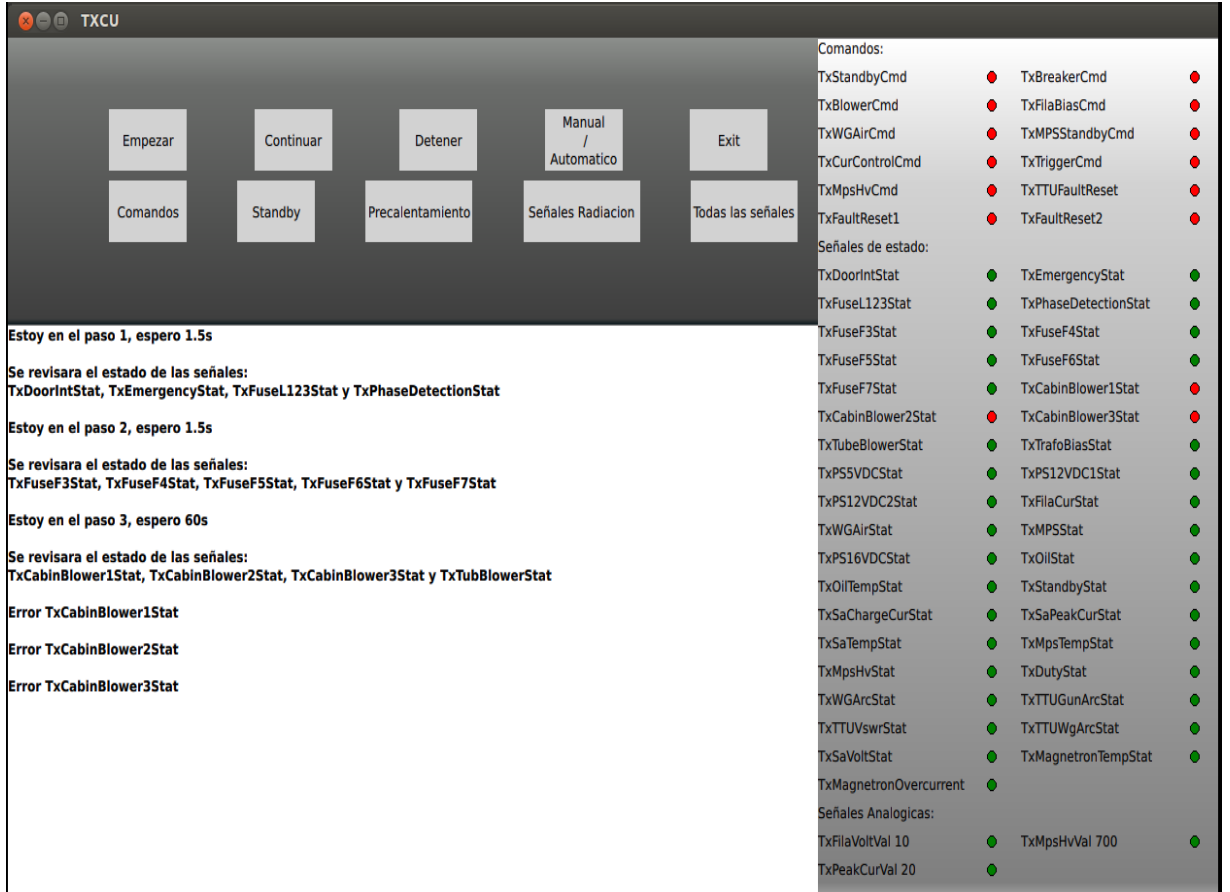


Figura N° 16: Simulación del sistema (error de los ventiladores).

- Caso 4:

A continuación se presenta el caso en el que ocurren dos fallas, la primera es el sobrecalentamiento del magnetrón y la segunda es una corriente excesiva en el magnetrón, en la figura N° 17, se observa como el sistema se detiene en el paso 19 e indica al técnico que hay un error de sobrecalentamiento en el magnetrón, más no se le indica nada sobre la corriente del magnetrón, esto se debe a que la señal de corriente del magnetrón todavía no está siendo revisada, esto se hará en el paso 20, y en el tiempo de rampa de ese paso es posible que la señal se active correctamente.

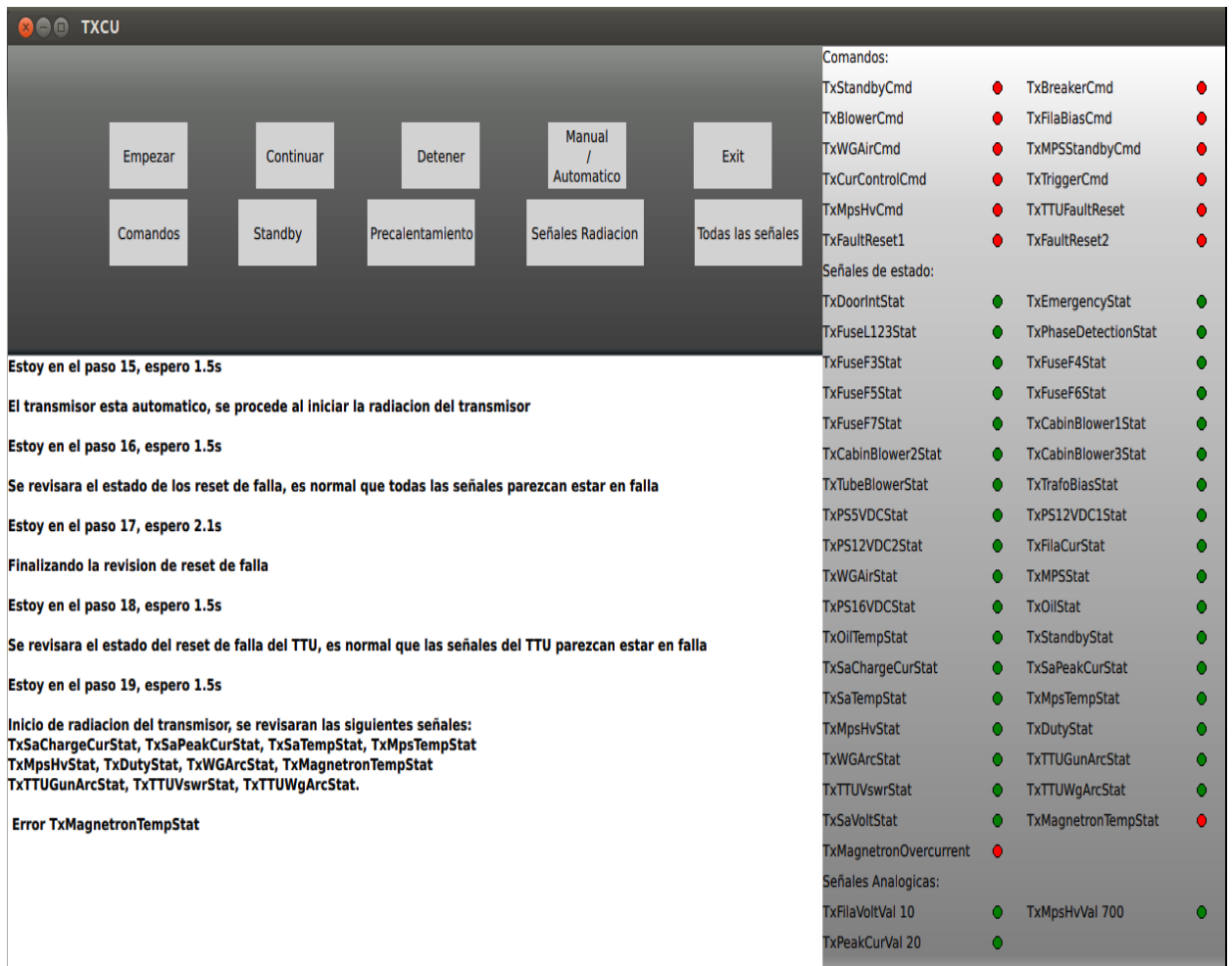


Figura N° 17.: Simulación del sistema (error *TxMagnetronTemp* y *TxMagnetronOverCurrent*).

- **Caso 5:**

En este caso se presenta la situación en la que todas las señales están activadas, pero el voltaje de filamentos se encuentra en un rango cercano al límite, para estos casos el proceso continuará tal como se observa en las figuras N° 18, 19 y 20, pero se le notificará al técnico del radar en cada paso del proceso la advertencia sobre la situación del valor en un rango de peligro, el encendido del transmisor no se detiene ya que el valor continua en el rango estipulado de funcionamiento, pero se

advierte de la situación para que se tomen las medidas necesarias, por ejemplo, detener el proceso y recalibrar la fuente de filamentos.

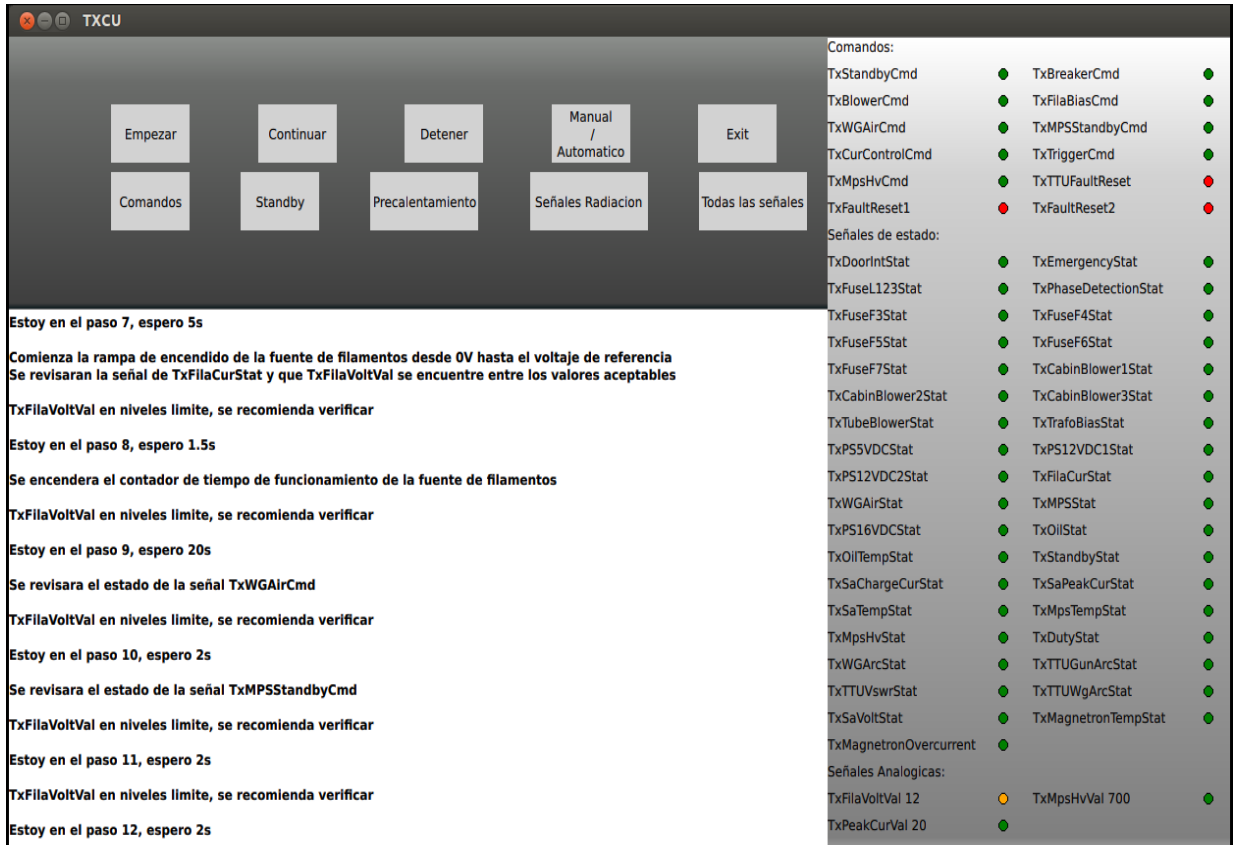


Figura N° 18.: Simulación del sistema (advertencia *TxFilaVoltVal* 1).

TXCU

Empezar

Comandos

Continuar

Standby

Detener

Pre calentamiento

Manual / Automatico

Señales Radiacion

Exit

Todas las señales

Comandos:

TxStandbyCmd	●	TxBreakerCmd	●
TxBlowerCmd	●	TxFilaBiasCmd	●
TxWGAirCmd	●	TxMPSStandbyCmd	●
TxCurControlCmd	●	TxTriggerCmd	●
TxMpsHvCmd	●	TxTTUFaultReset	●
TxFaultReset1	●	TxFaultReset2	●

Señales de estado:

TxDoorIntStat	●	TxEmergencyStat	●
TxFuseL123Stat	●	TxPhaseDetectionStat	●
TxFuseF3Stat	●	TxFuseF4Stat	●
TxFuseF5Stat	●	TxFuseF6Stat	●
TxFuseF7Stat	●	TxCabinBlower1Stat	●
TxCabinBlower2Stat	●	TxCabinBlower3Stat	●
TxTubeBlowerStat	●	TxTrafoBiasStat	●
TxPS5VDCStat	●	TxPS12VDC1Stat	●
TxPS12VDC2Stat	●	TxFilaCurStat	●
TxWGAirStat	●	TxMPSStat	●
TxPS16VDCStat	●	TxOilStat	●
TxOilTempStat	●	TxStandbyStat	●
TxSaChargeCurStat	●	TxSaPeakCurStat	●
TxSaTempStat	●	TxMpsTempStat	●
TxMpsHvStat	●	TxDutyStat	●
TxWGArcStat	●	TxTTUGunArcStat	●
TxTTUVswrStat	●	TxTTUWgArcStat	●
TxSaVoltStat	●	TxMagnetronTempStat	●
TxMagnetronOvercurrent	●		

Señales Analógicas:

TxFilaVoltVal 12	●	TxMpsHvVal 700	●
TxPeakCurVal 20	●		

Estoy en el paso 12, espero 2s

Se revisara el estado de la señal TxPS16VDCStat

TxFilaVoltVal en niveles limite, se recomienda verificar

Estoy en el paso 13, espero 2s

Se revisaran los estados de las señales TxOilStat y TxOilTempStat

TxFilaVoltVal en niveles limite, se recomienda verificar

Estoy en el paso 14, espero 1.5s

El transmisor esta correctamente en standby

TxFilaVoltVal en niveles limite, se recomienda verificar

Estoy en el paso 15, espero 1.5s

El transmisor esta automatico, se procede al iniciar la radiacion del transmisor

Estoy en el paso 16, espero 1.5s

Se revisara el estado de los reset de falla, es normal que todas las señales parezcan estar en falla

Estoy en el paso 17, espero 2.1s

Finalizando la revision de reset de falla

Figura N° 19.: Simulación del sistema (advertencia *TxFilaVoltVal 2*).

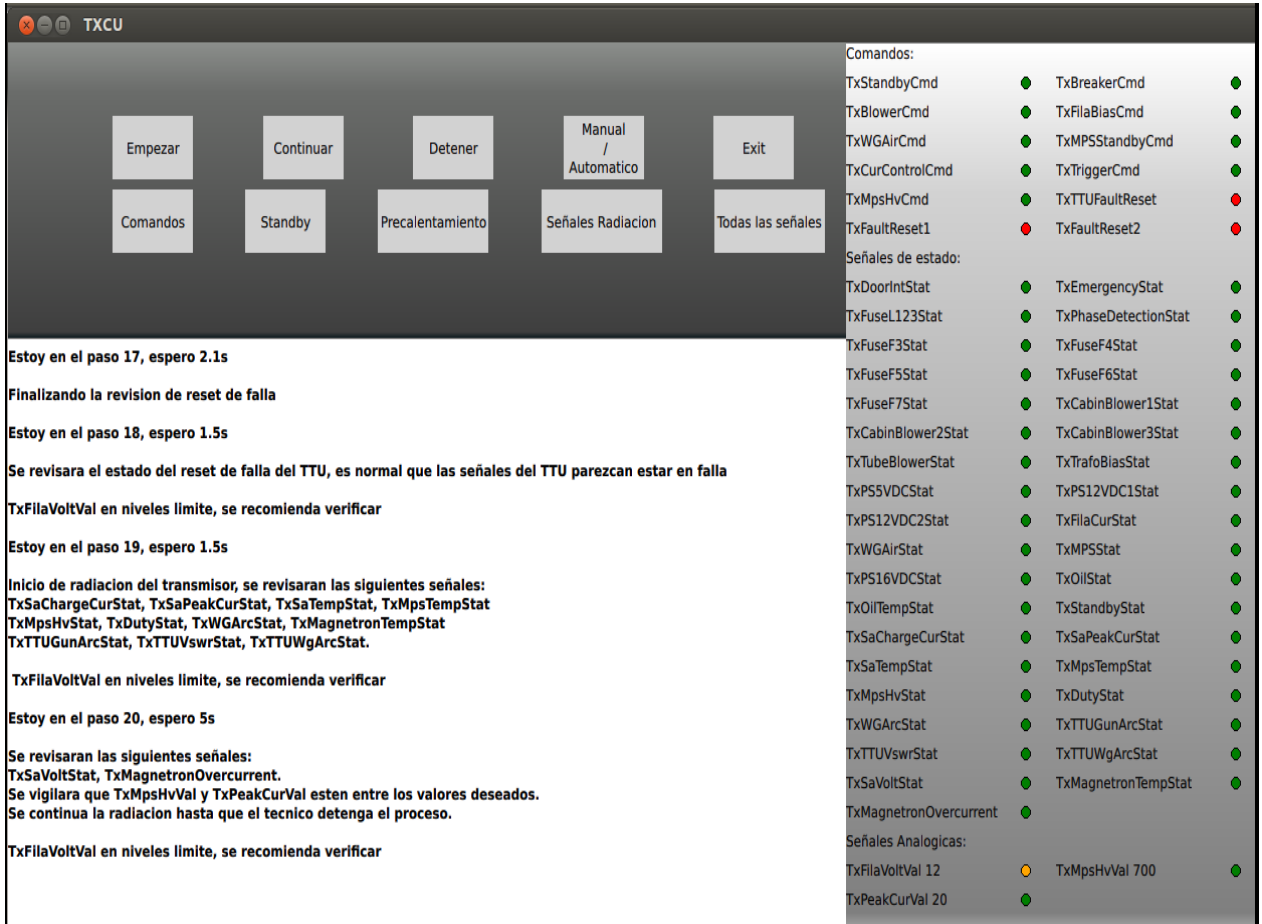


Figura N° 20.: Simulación del sistema (advertencia *TxFilaVoltVal* 3).

- Caso 6:

En el siguiente caso tratamos con la situación de sobretensión en el alto voltaje de la fuente principal de alimentación, como se observa en la figura N° 21 el proceso se detiene por completo, e indica al técnico de la falla.

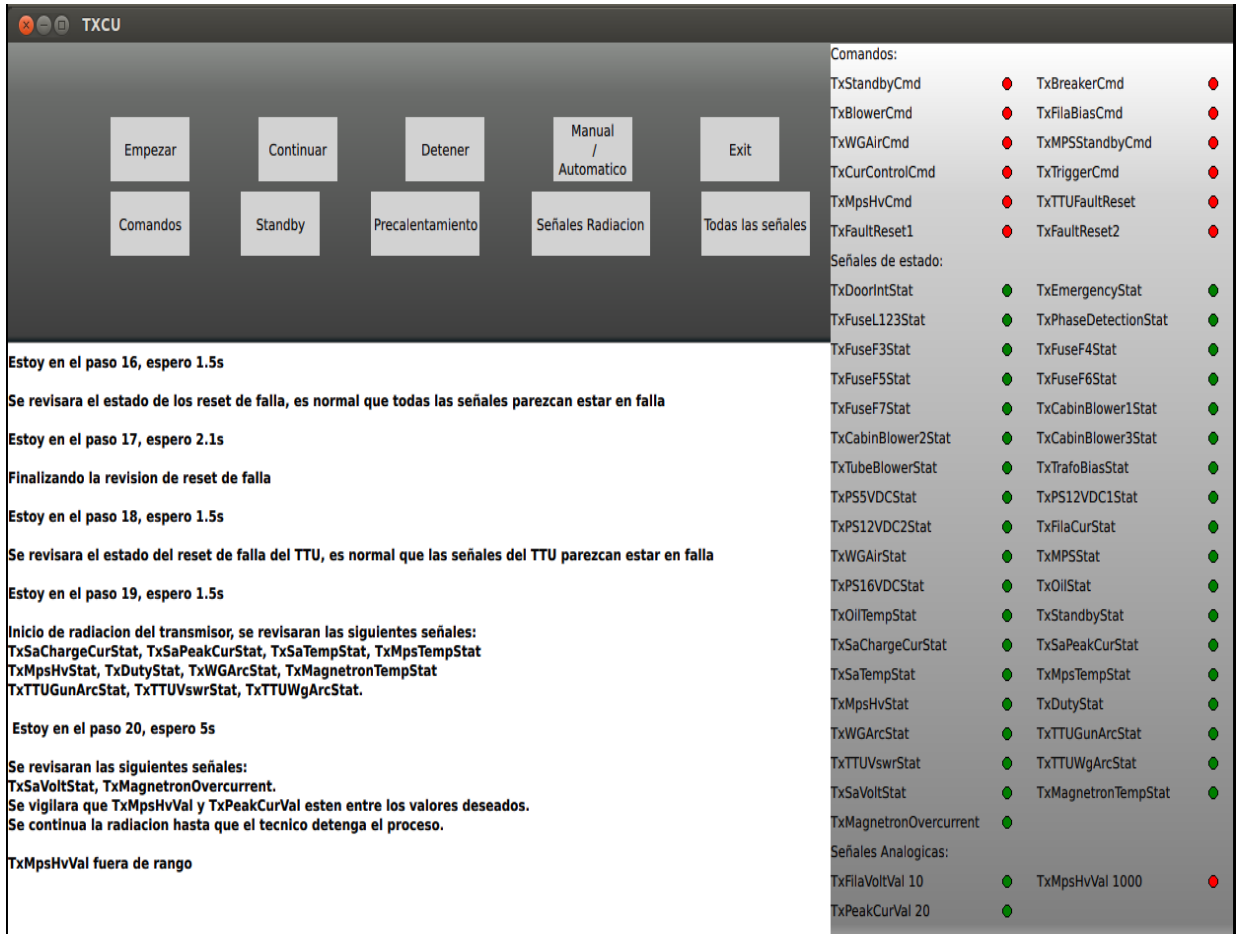


Figura N° 21.: Simulación del sistema (*TxMpsHvVal* fuera de rango).

- **Caso 7:**

En este último caso se presenta la situación mencionada en el caso 1, donde luego de terminar el proceso de encendido del transmisor y estar radiando, una de las señales da falla.

En la figura N° 22 observamos que el proceso de radiación y encendido del transmisor se detiene ya que todas las señales de comando están apagadas, y se le notifica al técnico del radar qué equipo generó la falla, en este caso particular es el fusible F7.

The screenshot displays the TXCU control interface. At the top, there are five buttons: Empezar, Continuar, Detener, Manual / Automatico, and Exit. Below these are five status indicators: Comandos, Standby, Pre calentamiento, Señales Radiacion, and Todas las señales. The main area shows a simulation process with the following steps:

- Estoy en el paso 16, espero 1.5s
- Se revisara el estado de los reset de falla, es normal que todas las señales parezcan estar en falla
- Estoy en el paso 17, espero 2.1s
- Finalizando la revision de reset de falla
- Estoy en el paso 18, espero 1.5s
- Se revisara el estado del reset de falla del TTU, es normal que las señales del TTU parezcan estar en falla
- Estoy en el paso 19, espero 1.5s
- Inicio de radiacion del transmisor, se revisaran las siguientes señales:
TxSaChargeCurStat, TxSaPeakCurStat, TxSaTempStat, TxMpsTempStat
TxMpsHvStat, TxDutyStat, TxWGArcStat, TxMagnetronTempStat
TxTTUGunArcStat, TxTTUVswrStat, TxTTUWgArcStat.
- Estoy en el paso 20, espero 5s
- Se revisaran las siguientes señales:
TxSaVoltStat, TxMagnetronOvercurrent.
- Se vigilara que TxMpsHvVal y TxPeakCurVal esten entre los valores deseados.
- Se continua la radiacion hasta que el tecnico detenga el proceso.
- Error TxFuseF7Stat

On the right side, there is a status panel with two sections: "Comandos" and "Señales de estado".

Comandos:

- TxBreakerCmd (Red dot)
- TxFilaBiasCmd (Red dot)
- TxMPSStandbyCmd (Red dot)
- TxTriggerCmd (Red dot)
- TxTTUFaultReset (Red dot)
- TxFaultReset1 (Red dot)
- TxFaultReset2 (Red dot)

Señales de estado:

- TxEmergencyStat (Green dot)
- TxPhaseDetectionStat (Green dot)
- TxFuseF3Stat (Green dot)
- TxFuseF5Stat (Green dot)
- TxFuseF6Stat (Green dot)
- TxFuseF7Stat (Red dot)
- TxCabinBlower1Stat (Green dot)
- TxCabinBlower2Stat (Green dot)
- TxCabinBlower3Stat (Green dot)
- TxTubeBlowerStat (Green dot)
- TxTrafoBiasStat (Green dot)
- TxPS5VDCStat (Green dot)
- TxPS12VDC1Stat (Green dot)
- TxPS12VDC2Stat (Green dot)
- TxFilaCurStat (Green dot)
- TxWGAIrStat (Green dot)
- TxMPSStat (Green dot)
- TxPS16VDCStat (Green dot)
- TxOilStat (Green dot)
- TxOilTempStat (Green dot)
- TxStandbyStat (Green dot)
- TxSaChargeCurStat (Green dot)
- TxSaPeakCurStat (Green dot)
- TxSaTempStat (Green dot)
- TxMpsTempStat (Green dot)
- TxMpsHvStat (Green dot)
- TxDutyStat (Green dot)
- TxWGArcStat (Green dot)
- TxTTUGunArcStat (Green dot)
- TxTTUVswrStat (Green dot)
- TxTTUWgArcStat (Green dot)
- TxSaVoltStat (Green dot)
- TxMagnetronTempStat (Green dot)
- TxMagnetronOvercurrent (Green dot)

Señales Analógicas:

- TxFilaVoltVal 10 (Green dot)
- TxMpsHvVal 700 (Green dot)
- TxPeakCurVal 20 (Green dot)

Figura N° 22.: Simulación del sistema (error *TxFuseF7Stat* luego de estar radiando).

5.2. Propuesta de integración al sistema de radar

El último paso del diseño es la integración al sistema de radar actual, donde se proponen los siguientes cambios:

El TXCU del transmisor actual y el control automático que realiza el LCU en el transmisor se retirarían, y serían reemplazados por el computador industrial y el programa realizado para el control del transmisor.

El control del receptor, clima y antena seguiría a cargo del LCU que trabajaría en paralelo en el mismo nivel de jerarquía del nuevo TXCU.

El programa de mantenimiento y control RAVIS®, seguiría teniendo la mayor jerarquía en el momento del control, permitiendo el control del radar desde las oficinas del INAMEH, aun sin la supervisión del técnico del radar, esto a través de la conexión Ethernet.

De esta forma se tendría el sistema de radar con transmisor de magnetrón controlado con el programa, manteniendo la misma estructura del sistema de radar actual.

CONCLUSIONES

A continuación se presentan las conclusiones obtenidas durante la realización de este trabajo especial de grado.

Se diseñó un sistema de supervisión y control para un transmisor a magnetrón como parte de un radar meteorológico del INAMEH, demostrándose así que es posible prescindir del tubo Klystron.

El diseño basado en un transmisor con magnetrón es una opción atractiva para un radar meteorológico, ya que simplifica el sistema, en lo que respecta a la cantidad de equipos, conllevando esto a una disminución los costos de reposición y de la probabilidad de falla.

Se verificó que el protocolo de comunicaciones PROFIBUS es compatible con las modificaciones sugeridas por el cambio de tecnología a magnetrón, sin presentar ningún inconveniente, permitiendo la interacción entre los distintos equipos del sistema de transmisión y el SCADA.

Se diseñó un algoritmo de control ajustado a los requerimientos para el encendido, puesta a punto y operación, de un transmisor de radar basado en magnetrón, considerando todos los aspectos de seguridad incluidos en el sistema de radar Gematronik.

El uso de un PC industrial como controlador permitió implementar, mediante el lenguaje QML y C++, la realización del SCADA, generándose de esta forma, una interfaz hombre-máquina simple e intuitiva, presentando los datos en tiempo real al usuario.

El SCADA realizado fue aprobado por el personal técnico del INAMEH ya que es capaz de detectar cualquier falla en el proceso de encendido y de radiación del transmisor, generando alarmas e históricos de los valores de las señales.

El diseño propuesto fue validado con una serie de simulaciones del programa tomando algunos de los diferentes casos posibles en el encendido y operación del radar basado en magnetrón.

Por último, se propone una manera sencilla para la integración del sistema SCADA diseñado para el transmisor, con el sistema SCADA del radar.

RECOMENDACIONES

A continuación se presentan una serie de recomendaciones que pueden ser útiles para la realización de futuros trabajos.

Se recomienda una ampliación del programa de control, de forma que se pueda controlar los movimientos de la antena y las señales del receptor, para que el computador industrial reemplace en un 100% las funciones del LCU y de esta forma integrar el control de una forma más completa en el sistema de radar.

Es recomendable realizar un programa integral para el control del radar y que se tenga dominio sobre su estructura y configuración a los fines de poder dominar mejor esta tecnología, realizando estudios y diseños en forma similar al presente trabajo.

En caso de utilizar Qt Creator como plataforma de desarrollo de los programas, se debe tomar en cuenta que el tiempo de duración del código de C++ debe ser lo más corto posible para evitar lentitud en la interfaz visual.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Skolnik, M. (2008) Radar Handbook, 3^{ra}Edición, McGraw Hill, chapter 10: “The Radar Transmitter” p. 10.1-10.16
- [2] Barton D., Leonov S. (1998) Radar Technology Encyclopedia, electronic edition. ArtechHouse, INC. Boston, London, p. 232-233
- [3] Rodríguez Penin, Aquilino. (2007) Sistemas SCADA, 2^{da}Edición, Marcombo ediciones técnicas y Alfaomega grupo editor, Capitulo 1 “Sistemas de visualización industrial”, p 19-27.
- [4] Rainbow[®] Operator’s Manual, Volume 1, Selex Systems integration Gmbh, Gematronik Weather Radar Systems, Alemania.
- [5] Rainbow[®] Operator’s Manual, Volume 2, Selex Systems integration Gmbh, Gematronik Weather Radar Systems, Alemania.
- [6] Meteor 1500S Weather Radar Hardware Training, Selex Systems integration Gmbh, Gematronik Weather Radar Systems, Alemania.

ANEXOS