

**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO**

**Software Orientado a Sistemas de Control HMI/Scada usando Recursos  
Libres y de Código Abierto, desarrollado sobre Plataforma Linux**

**Christian Bolívar Moya Calderón**

Tesis de Grado presentada como requisito para la obtención del título de:

Ingeniero Eléctrico/Electrónico

Quito, Diciembre de 2009

Universidad San Francisco de Quito

Colegio de Ciencias e Ingeniería

HOJA DE APROBACIÓN DE TESIS

**Software Orientado a Sistemas de Control HMI/Scada usando Recursos Libres y de  
Código Abierto, sobre Plataforma Linux**

**Christian Bolívar Moya Calderón**

Lucia Quintero, Ph.D

Director de Tesis

---

Omar Aguirre, M.Sc.

Miembro del comité de Tesis

---

Daniel Cárdenas, Ph.D

Miembro del comité de Tesis

---

Santiago Navarro, Ph.D

Director de la Carrera Ingeniería Electrónica

---

Quito, Diciembre 2009

© Derechos de autor

Christian Bolívar Moya Calderón

2009

*A mis Padres, por su constante apoyo.*

## **Agradecimientos**

A mis padres: Bolívar y Mónica, por todo el apoyo que supieron darme durante estos cinco años de carrera Universitaria, y especialmente durante la realización de este trabajo. Corriendo el riesgo de ser repetitivo, les agradezco mucho porque han sido mi guía y a la vez las personas que más admiro y respeto por toda su dedicación y constancia para con sus hijos. Gracias a su esfuerzo yo he tenido todas estas oportunidades y las cuales no he desaprovechado. Quiero agradecer a mi hermana y demás familiares que de una u otra forma me han brindado todo su apoyo y consejos.

Me gustaría extender mi agradecimiento a mi directora de Tesis, Lucía quien siempre me brindo su apoyo y guía.

A mis compañeros por todos los momentos que vivimos durante estos cinco años, por las dificultades que enfrentamos y supimos salir adelante.

Finalmente, quisiera terminar agradeciendo a todos mis profesores, quienes supieron guiarme durante este camino, por todos los conocimientos adquiridos, y por todas las experiencias académicas obtenidas.

## **Resumen**

Este trabajo consiste en el diseño, desarrollo, e implementación de una aplicación o software de generación de sistemas HMI/Scada, usando software libre y de código abierto. La aplicación llamada CM (por las primeras letras de **C**hristian **M**oya) está escrita en el lenguaje de programación Python, e implementada sobre el sistema operativo Linux. El objetivo de esta aplicación es convertirse en una alternativa libre y de código abierto, del software propietario de desarrollo de sistemas HMI/Scada. La aplicación está dividida en tres módulos independientes. El primer módulo es un Servidor Scada para la adquisición de datos del proceso. El segundo módulo es un administrador de los datos del proceso (Almacenamiento, Alarmas y Control). El último módulo es un sistema de visualización de datos del proceso o cliente HMI ( Human Machine Interface). Finalmente, cada módulo se encuentra enlazado mediante un sistema de gestión de datos, empleado a través de las bases de datos MySQL de cada módulo.

## **Abstract**

This work consists in the design, development and implementation of an application or software to build HMI/Scada systems, using free software and open source software. The application called CM (by the first letter from **C**hristian **M**oya), is written in the Python programming language and implemented over Linux operating system. The goal of this application is to become a free and open source alternative to proprietary HMI/Scada development software. The application is divided in three independent modules. The first module is a Scada Server for process data acquisition. The second module is a process data manager (Data Store, Alarms and Control). The last module is a process data visualization system or HMI (Human Machine Interface) client. Finally, each module is linked with each other by a data management system, developed through each module's MySQL database.

## Contenido

<b>Agradecimientos</b> .....	<b>v</b>
<b>Resumen</b> .....	<b>vi</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>vii</b>
<b>Contenido</b> .....	<b>viii</b>
<b>Lista de Figuras</b> .....	<b>xiii</b>
<b>Lista de Tablas</b> .....	<b>xv</b>
<b>1. Introducción</b> .....	<b>1</b>
1.1 Motivación .....	1
1.2 Objetivos .....	2
1.2.1 Objetivo General .....	2
1.2.2 Objetivos Específicos .....	2
1.3 Contenido del Documento .....	3
<b>2. Sistemas Scada</b> .....	<b>5</b>
2.1 Descripción General del los Sistemas Scada .....	5
2.1.1 Definición .....	5
2.1.2 Antecedentes y Evolución de los Sistemas Scada .....	5
2.1.3 Aplicaciones de los Sistemas Scada .....	6
2.2 Características Generales de los Sistemas Scada .....	6
2.3 Características Operativas de los Sistemas Scada .....	7
2.4 Arquitectura de los Sistemas Scada .....	8
2.4.1 Sistemas Scada Centralizados .....	8
2.4.2 Sistemas Scada Distribuidos .....	8
2.4.3 Sistemas Redundantes .....	9
2.4.4 Sistemas Expandibles o Escalables .....	11
2.5 Estructura Funcional de los Sistemas Scada .....	12
2.6 Hardware de Adquisición de datos .....	12
2.6.1 Elementos de Campo .....	12
2.6.2 Unidades Terminales Remotas (UTR's) .....	13
2.6.3 Controladores Lógicos Programables (PLC's) .....	14
2.6.4 PLC's vs UTR's .....	14
2.7 Red de Comunicación Industrial .....	15
2.7.1 Modos de Transmisión de datos y Protocolos de Comunicación Industrial .....	15
2.7.2 Estándar de Interfaz de Comunicación Serial .....	16
2.7.3 Estándar de Interfaz RS-485 .....	19



2.7. 4 Protocolo de Comunicación Modbus .....	20
2.8 Sistemas de Gestión de Bases de Datos .....	46
2.8.1 Descripción de Sistemas de Gestión de Base de Datos.....	46
2.8.2 Elementos en un sistema de base de datos .....	47
2.8.3 Tipos de Datos.....	47
2.8.4 Administración y funciones dentro de una base de datos .....	47
2.8.5 Aplicaciones y Ventajas de las Bases de Datos .....	48
2.8.6 Bases de datos Relacionales:.....	48
2.9 Sistemas de Visualización de Datos: Interfaces Hombre Máquina (HMI: Human Machine Interface) .....	49
2.9.1 Definición.....	49
2.9.2 Funciones de aplicaciones HMI .....	49
2.9.3 Desarrollo de Aplicaciones HMI.....	50
2.9.4 Estándar ANSI /ISA 5.1 1984 (R1992).....	50
2.9.5 Estándar ISA-5.5-1985.....	56
2.10 Software de Desarrollo de Sistemas HMI/SCADA .....	58
2.10.1 Antecedentes y Descripción del Software de Desarrollo de sistemas HMI/Scada existente. ....	58
2.10.2 Funciones del Software de desarrollo de Sistemas HMI/Scada.....	59
<b>3. Software Libre (Free Software) y Software de Código Abierto (Open Source Software) .....</b>	<b>61</b>
3.1 Fundación de Software Libre (Free Software Foundation) .....	61
3.1.1 Descripción General .....	61
3.1.2 Características definidas por la Fundación de Software Libre.....	61
3.2 Iniciativa de Código Abierto (Open Source Initiative).....	62
3.2.1 Descripción General .....	62
3.2.2 Características definidas por la Iniciativa de Código Abierto.....	63
3.3 Sistema Operativo Linux .....	64
3.3.1 Descripción General del sistema Operativo Linux .....	64
3.3.2 Kernel de Linux.....	64
3.3.3 Características Principales de Linux .....	64
3.3.4 Beneficios de Linux sobre otros sistemas operativos. ....	65
3.3.5 Distribuciones de Linux .....	66
3.4 Ubuntu .....	67
3.4.1 Descripción General.....	67
3.4.2 Características principales.....	67
3.5 Python .....	67

3.5.1 Descripción General.....	67
3.5.2 Características Principales.....	68
3.5.3 Aplicaciones .....	68
3.5.4 Instalación .....	69
3.6 MySQL .....	69
3.6.1 Descripción General.....	69
3.6.2 Lenguaje SQL (Structured Query Language) .....	70
3.6.3 Características .....	70
3.6.4 Instalación .....	71
3.7 pySerial .....	72
3.7.1 Descripción General.....	72
3.7.2 Características Generales .....	73
3.7.3 Instalación: .....	73
3.8 MySQLdb .....	74
3.8.1 Descripción General.....	74
3.8.2 Características Generales .....	74
3.8.3 Instalación .....	75
3.9 Matplotlib.....	75
3.9.1 Descripción General.....	75
3.9.2 Características Generales .....	76
3.9.3 Instalación .....	76
3.10 wxPython .....	77
3.10.1 Descripción General.....	77
3.10.2 Características Generales .....	77
3.10.3 Instalación .....	77
3.11 wxGlade .....	78
3.11.1 Descripción General.....	78
3.11.2 Características Generales .....	78
3.11.3 Instalación .....	79
3.12 Diseño Estructural de la Aplicación CM a partir del Software Libre y Software de Código Abierto Descrito. ....	79
3.12.1 Descripción General.....	79
<b>4. Control de Procesos Industriales mediante Aplicaciones Scada.....</b>	<b>81</b>
4.1 Sistemas de Control en Tiempo Real.....	81
4.1.1 Definición de Sistemas de Control en Tiempo Real .....	81
4.1.2 Características de los Sistemas de Control en Tiempo Real .....	81
4.1.3 Problema de Control en Sistemas de Tiempo Real.....	82

4.1.4 Consideraciones de diseño de Sistemas de Control en Tiempo Real.....	83
4.2 Sistemas de Control Multivariable .....	83
4.2.1 Definición de Sistemas de Control Multivariable.....	83
4.2.2 Características de los sistemas de control multivariable.....	84
4.2.3 Problema de Control en Sistemas de Múltiples Entradas Múltiples Salidas.....	84
4.2.4 Consideraciones de Diseño de Sistemas de Control Multivariable.....	85
<b>5. CM – HMI/Scada.....</b>	<b>86</b>
5.1 Antecedentes .....	86
5.2 Objetivo de CM .....	86
5.3 Evolución Temporal de CM .....	87
5.4 Detalles Constructivos de CM .....	89
5.4.1 Lenguaje de Programación: Python .....	89
5.4.2 Plataforma/Sistema Operativo: Ubuntu Linux (Windows).....	89
5.4.3 Sistema de gestión de base de datos: MySQL y python-MySQLdb.....	90
5.4.4 Generación de interfaces Hombre-Máquina: wxPython.....	90
5.4.5 Generación de Gráficas de Tendencia y Gráficos de Históricos: Matplotlib.....	90
5.4.6 Generación de Algoritmos de control: Python-Numpy.....	90
5.4.7 Sistema de Comunicación: Python-pyserial.....	90
5.5 CM Características del Sistema .....	91
5.5.1 Características principales de la aplicación CM .....	91
5.5.2 Características Básicas de un Scada desarrollado en CM.....	92
5.5.3 Características del sistema de gestión de Interfaces Hombre-Máquina desarrollado en CM.....	92
5.6 CM Aplicación HMI/Scada. Descripción Funcional.....	92
5.6.1 Análisis Funcional.....	92
5.6.2 Funciones HMI/Scada.....	93
5.6.3 Funciones de CM .....	94
5.7 Flujo de Datos en CM.....	94
5.8 Arquitectura de CM .....	95
5.8.1 Servidor Scada (CMScadaServer).....	97
5.8.2 Administrador del Proceso (CMProcessAdmin).....	98
5.8.3 Cliente HMI (CMHMISTation) .....	100
5.9 Arquitectura de la Base de Datos.....	103
5.9.1 CMScadaServer_db.....	107
5.9.2 CMHMISTation_db .....	107
5.9.3 CMProcessAdmin_db .....	109
5.10 Descripción Estructural de CM.....	110

5.10.1 CMScadaServer.....	111
5.10.2 CMHMIProcessAdmin .....	117
5.10.3 CMHMIstation .....	121
5.11 Desarrollar un Sistema HMI/Scada en CM .....	129
<b>6. Consideraciones Finales .....</b>	<b>132</b>
6.1 Conclusiones .....	132
6.2 Trabajo Futuro .....	132
<b>Referencias .....</b>	<b>134</b>
<b>Anexos.....</b>	<b>136</b>
<b>A. Manual de Configuración de la Aplicación CM .....</b>	<b>136</b>
<b>B. Programas de CM.....</b>	<b>147</b>

## Lista de Figuras

<b>Figura 2.1:</b> Sistema Scada sin Redundancia.....	9
<b>Figura 2.2:</b> Sistema Scada con Redundancia (Servidor de Respaldo) .....	10
<b>Figura 2.3:</b> Sistema Scada con Redundancia de Servidor y Dispositivos de campo .....	11
<b>Figura 2.4:</b> Diagrama de flujo de la lectura de estado de bobinas .....	26
<b>Figura 2.5:</b> Diagrama de flujo de la lectura de estado de entradas discretas.....	30
<b>Figura 2.6:</b> Diagrama de flujo de la lectura de registros internos .....	33
<b>Figura 2.7:</b> Diagrama de flujo de la lectura de registros de entrada.....	37
<b>Figura 2.8:</b> Diagrama de flujo de la escritura de bobinas individualmente.....	41
<b>Figura 2.9:</b> Diagrama de flujo de la escritura de registros individualmente .....	44
<b>Figura 3.1:</b> Diagrama estructural de la construcción de CM mediante distintas aplicaciones Libres y de código abierto.....	80
<b>Figura 4.1:</b> Sistema de Múltiples Entradas Múltiples Salidas (MIMO system).....	84
<b>Figura 5.1:</b> Esquema funcional de un Sistema HMI/Scada.....	93
<b>Figura 5.2:</b> Flujo de datos dentro del Sistema CM.....	96
<b>Figura 5.3:</b> Arquitectura general de CM.....	96
<b>Figura 5.4:</b> Diagrama del funcionamiento de CMScadaServer con dos PLC's .....	98
<b>Figura 5.5:</b> Diagrama de Flujo de la Operación básica del Servidor Scada de CM durante cada intervalo de acceso o PollTime.....	99
<b>Figura 5.6:</b> Diagrama de Flujo de la Operación básica del Administrador del Proceso de CM durante un Intervalo de tiempo de escaneo de un Tag.....	101
<b>Figura 5.7:</b> Eventos que influyen sobre el comportamiento del módulo CMHMStation	102
<b>Figura 5.8:</b> Diálogo de presentación del sistema CM, en HTML .....	111
<b>Figura 5.9:</b> HMI desplegado en la ejecución del Servidor Scada CM .....	112
<b>Figura 5.10:</b> GUI de inicio del Servidor Scada CM.....	113
<b>Figura 5.11:</b> HMI para diseño de controladores basados en Python.....	117
<b>Figura 5.12:</b> GUI de inicialización del Administrador del Proceso .....	118
<b>Figura 5.13:</b> HMI de Alarmas .....	122
<b>Figura 5.14:</b> HMI Entrada Analógica.....	122
<b>Figura 5.15:</b> HMI Salida Analógica .....	123
<b>Figura 5.16:</b> HMI Tabla de datos almacenados.....	124
<b>Figura 5.17:</b> HMI Entrada Digital .....	124
<b>Figura 5.18:</b> HMI Históricos .....	125
<b>Figura 5.19:</b> HMI Principal de CM .....	125
<b>Figura 5.20:</b> HMI Gráfico de Tendencia.....	126
<b>Figura 5.21:</b> Interfaz gráfica de usuario de inicio de CMHMStation.....	126
<b>Figura 5.22:</b> Interfaz gráfica de usuario de configuración y administración de Tags.....	127
<b>Figura A.1:</b> Diagrama de flujo de los Procesos de configuración de CM.....	136
<b>Figura A.2:</b> Interfaz Gráfica de Usuario para la configuración Básica del Servidor Scada.....	139

<b>Figura A.3:</b> Interfaz Gráfica de Usuario para la configuración del Puerto Serial.....	139
<b>Figura A.4:</b> Interfaz Gráfica de Usuario de Inicio del módulo CMHMIstation.....	140
<b>Figura A.5:</b> Interfaz Gráfica de Usuario de configuración de Entradas Analógicas.....	141
<b>Figura A.6:</b> Interfaz Gráfica de Usuario de configuración de Salidas Analógicas .....	141
<b>Figura A.7:</b> Interfaz Gráfica de Usuario de configuración de Entradas Digitales .....	142
<b>Figura A.8:</b> Interfaz Gráfica de Usuario de configuración de Salidas Digitales.....	142
<b>Figura A.9:</b> Interfaz Gráfica de Usuario de configuración de Gráficos de Tendencia.....	143
<b>Figura A.10:</b> Interfaz Gráfica de Usuario de Configuración de Cálculos.....	143
<b>Figura A.11:</b> Interfaz Gráfica de Usuario de Configuración de Alarmas de Entradas Analógicas y Cálculos .....	144
<b>Figura A.12:</b> Interfaz Gráfica de Usuario de Configuración de Alarmas de Entradas Digitales .....	145
<b>Figura A.13:</b> Interfaz Hombre-Máquina para la Generación de Algoritmos de Control.	145
<b>Figura A.14:</b> Interfaz Gráfica de Usuario de Configuración de Consultas Modbus.....	146
<b>Figura A.15:</b> Interfaz Hombre-Máquina Principal del Proceso .....	146

## Lista de Tablas

<b>Tabla 2.1:</b> Niveles de Voltaje del receptor en el estándar de comunicación RS-232.....	17
<b>Tabla 2.2:</b> Distribución de pines conectores DB9 y DB25 .....	18
<b>Tabla 2.3:</b> Niveles de Voltaje del receptor en el estándar de comunicación RS-485.....	20
<b>Tabla 2.4:</b> Campos de un mensaje de consulta usando la función 0x01 .....	24
<b>Tabla 2.5:</b> Campos de un mensaje de respuesta usando la función 0x01.....	24
<b>Tabla 2.6:</b> Campos de un mensaje de respuesta de excepción usando la función 0x01.....	25
<b>Tabla 2.7:</b> Valores de los campos de los mensajes de consulta y respuesta del ejemplo usando la función 0x01 (Estado de las bobinas 25 a 45). .....	25
<b>Tabla 2.8:</b> Campos de un mensaje de consulta usando la función 0x02 .....	28
<b>Tabla 2.9:</b> Campos de un mensaje de respuesta usando la función 0x02.....	28
<b>Tabla 2.10:</b> Campos de un mensaje de respuesta de excepción usando la función 0x02...	29
<b>Tabla 2.11:</b> Valores de los campos de los mensajes de consulta y respuesta del ejemplo usando la función 0x02 (Estado de entradas discretas 6 a 12).....	29
<b>Tabla 2.12:</b> Campos de un mensaje de consulta usando la función 0x03 .....	31
<b>Tabla 2.13:</b> Campos de un mensaje de respuesta usando la función 0x03.....	32
<b>Tabla 2.14:</b> Campos de un mensaje de respuesta de excepción usando la función 0x03...	32
<b>Tabla 2.15:</b> Valores de los campos de los mensajes de consulta y respuesta del ejemplo usando la función 0x03 (Estado de registros internos 27 y 28) .....	34
<b>Tabla 2.16:</b> Campos de un mensaje de consulta usando la función 0x04 .....	35
<b>Tabla 2.17:</b> Campos de un mensaje de respuesta usando la función 0x04.....	36
<b>Tabla 2.18:</b> Campos de un mensaje de respuesta de excepción usando la función 0x04...	36
<b>Tabla 2.19:</b> Valores de los campos de los mensajes de consulta y respuesta del ejemplo usando la función 0x04 (Estado de registros de entrada 77, 78 y 79) .....	38
<b>Tabla 2.20:</b> Campos de un mensaje de consulta usando la función 0x05 .....	39
<b>Tabla 2.21:</b> Campos de un mensaje de respuesta de excepción usando la función 0x05...	40
<b>Tabla 2.22:</b> Valores de los campos de los mensajes de consulta y respuesta del ejemplo usando la función 0x05 (Cambiar a encendido (1) la bobina 47).....	40
<b>Tabla 2.23:</b> Campos de un mensaje de consulta usando la función 0x06 .....	42
<b>Tabla 2.24:</b> Campos de un mensaje de respuesta de excepción usando la función 0x06...	43
<b>Tabla 2.25:</b> Valores de los campos de los mensajes de consulta y respuesta del ejemplo usando la función 0x06 (Fijar el valor de 29 decimal en el registro 07) .....	43
<b>Tabla 2.26:</b> Ejemplo de designación de la identificación de un instrumento usando el estándar ANSI/ISA 5.1 .....	54
<b>Tabla 2.27:</b> Significado e identificación de letras, para la designación de instrumentos funciones o variables mediante tags .....	56
<b>Tabla 2.28:</b> Significado de Colores Sugerido, para el diseño de despliegues .....	57