



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA  
FACULTAD DE ELECTROTECNIA Y COMPUTACIÓN**

**INFORME DE TRABAJO MONOGRÁFICO**

**SISTEMA OPERATIVO PARA ROBOTS(ROS): APLICACIÓN EN EL  
DESARROLLO DE UN LABORATORIO VIRTUAL PARA EL ESTUDIO  
DE LOS FUNDAMENTOS DE LA ROBÓTICA INDUSTRIAL**

Presentado por: Br. Yeser Alfredo Morales Calero

Tutor: MSc. Alejandro Alberto Méndez Talavera

Diciembre 12, 2018

## DEDICATORIA

Agradecimientos: A mis seres queridos, amigos y a mi tutor de UNI por la inspiración y paciencia otorgada.

*“All things are difficult before they are easy.”*

*-Thomas Fuller*

## **RESUMEN**

## **ABSTRACT**

## **INDICE**

INTRODUCCIÓN.....	1
OBJETIVOS .....	4
JUSTIFICACIÓN .....	5
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO .....	7
1.1    Tipos de laboratorios .....	7
1.1.1    Laboratorio Físico.....	8
1.1.2    Laboratorio Virtual .....	8
1.1.3    Laboratorio Remoto online .....	8
1.1.4    Realidad virtual 3D .....	8
1.2    Sistema operativo para robot (ROS).....	11
1.2.1    Conceptos básicos de ROS .....	11
1.2.1.1    Nodos (Nodes) .....	12
1.2.1.2    Mensajes (Messages) .....	12
1.2.1.3    Tópico (Topic) .....	13
1.2.1.4    Maestro (master) .....	13
1.2.1.5    Servicios (services) .....	13
1.2.1.6    Bolsas (bags) .....	13
1.2.2    Librerías de ROS .....	15
1.2.3    Herramientas de visualización de datos en ROS .....	16
1.2.3.1    RVIZ .....	16
1.2.3.2    RQT.....	17
1.2.3.3    Movelt!.....	18
1.2.4    Lenguajes de programación soportados por ROS .....	18
1.3    Laboratorio virtual para robótica industrial .....	20
1.3.1    Interfaz gráfica de usuario (GUI) .....	21
1.3.2    Fundamentos de la robótica industrial.....	23
1.3.2.1    Morfología del robot.....	23
1.3.2.2    Herramientas matemáticas.....	24
1.3.2.3    Cinemática directa e inversa .....	24
1.3.2.4    Programación y simulación del robot.....	26
1.4    Uso del laboratorio virtual de robótica industrial .....	30
CAPÍTULO II: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL LABORATORIO VIRTUAL DE ROBÓTICA INSDUSTRIAL .....	31

2.1	Recursos de software .....	31
2.1.1	Sistema operativo Ubuntu .....	31
2.1.2	ROS .....	32
2.1.2.1	Instalación y Puesta en marcha de ROS.....	33
2.1.2.2	Estructura de ROS .....	35
2.1.2.3	Compilación de Paquetes de ROS.....	38
2.1.3	IDE QT-Creator.....	41
2.1.3.1	Plugin de ROS para Qt-Creator.....	43
2.1.3.2	Widgets QT .....	43
2.1.3.3	Widgets QML.....	45
2.1.4	Librería Orocov .....	45
2.1.5	Open Rave IkFast .....	47
2.1.6	Reuleaux .....	47
2.1.7	QCustomPlot.....	48
2.2	Diseño del LVR .....	49
2.2.1	Modelos de los robots .....	50
2.2.1.1	Modelos de los Fabricantes de robots.....	51
2.2.1.2	Modelos Creado por el usuario .....	51
2.2.1.2.1	URDF .....	52
2.2.1.3	Soporte de ROS – Industrial.....	53
2.2.1.3.1	Estructura de Un paquete ROS-I.....	53
2.2.1.3.1.1	Archivos CAD de los robots industriales.....	54
2.2.1.3.2	Validación de los modelos de Robots utilizados.....	55
2.2.2	Diseño de la interfaz principal.....	58
2.2.2.1	Recursos Bibliográficos .....	59
2.2.2.2	Recursos Visuales.....	59
2.2.2.3	Ejecución de Procesos de ROS .....	59
2.2.3	Diseño de la Interfaz Modelación de Robots .....	60
2.2.4	Diseño de la Interfaz de Matemática y Cinemática de Robots .....	61
2.2.4.1	Matemática de los robots .....	62
2.2.4.2	Denavit - Hartenberg .....	64
2.2.4.3	Cinemática de Robots .....	65
2.2.5	Diseño del módulo de Programación de los Robots.....	66
2.2.5.1	Gazebo Celda de trabajo.....	67
2.2.5.2	Diseño de la interfaz interprete de comandos .....	68

2.3 Implementación del LVR.....	69
2.3.1 Implementación de la interfaz principal.....	69
2.3.1.1 Recursos Bibliográficos .....	72
2.3.1.2 Recursos Visuales.....	73
2.3.1.3 Ejecución de Procesos de ROS .....	74
2.3.2 Implementación de la Interfaz Modelación de Robots.....	75
2.3.2.1 Creación de Interfaz en Qt .....	76
2.3.2.2 Programación de los recursos de ROS .....	77
2.3.3 Implementación de la Interfaz de Matemática y Cinemática de Robots	
80	
2.3.3.1 Creación de Interfaz en Qt .....	80
2.3.3.2 Programación de los recursos de ROS .....	81
2.3.3.2.1 Visualizador 3D de robots virtuales .....	81
2.3.3.2.2 Selección de los robots dentro de la interfaz.....	84
CAPÍTULO III: ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	100
CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	101
BIBLIOGRAFÍA.....	103
ANEXOS.....	107
A: Instalación de Recursos de Software para el Laboratorio Virtual.....	108
A.1 Instalación de UBUNTU 16.04 Xenial .....	108
A.2 Instalación de ROS Kinetic .....	110
A.3 Espacio de trabajo Catkin .....	111
A.4 Instalación de QT – Creator.....	112
A.5 Instalación del Plugin ROS para QT – Creator.....	112
A.6 Instalación de Gazebo .....	114

## **Lista de Figuras**

### **Capítulo I**

Figura 1.1: Esquema de Funcionamiento de la Arquitectura de ROS .....	14
Figura 1.2: Comunicación utilizando Tópicos. En Topics por ROBOTIS Co., Ltd 2017.....	14
Figura 1.3: Nodo robot_localization recibiendo tópicos de un robot físico y mostrando su localización en el ambiente virtual. En robot_localization por Charles River Analytics Inc 2017. ....	15
Figura 1.4: RVIZ y visualización de modelo de robot y datos provenientes de mensajes 3D. ....	17
Figura 1.5: Gráfico de línea XY de datos provenientes de nodos.....	17
Figura 1.6: Modelo de robot, sistemas de referencia. En “Robótica” (P.6), por J. J. Craig, 2006.....	24
Figura 1.7: Cinemática directa e inversa En “Fundamentos de robótica” (P.119), por A. Barrientos et al, 2007 .....	25
Figura 1.8: Modelo de utilización del LVR. ....	30

### **Capítulo II**

Figura 2. 1 Logo del sistema operativo para robots.....	32
Figura 2.2: Logo de la distribución de ROS, Kinetic Kame.....	33
Figura 2.3: roscore servidor maestro .....	35
Figura 2.4: Organización del software en ROS .....	36
Figura 2.5: Organización de un paquete de software en ROS .....	37
Figura 2.6: Espacio de Trabajo Con Catkin.....	38
Figura 2.7: Archivo CMakeLists con parámetros para compilación .....	39
Figura 2.8: Archivo package.xml con etiquetas de referencia de paquetes.....	40
Figura 2.9: Logo de QT-Creator .....	41
Figura 2.10: Recursos de QT para el Desarrollador.....	42
Figura 2.11: Plugin CATKIN con QT-Creator Creación del Workspace de Trabajo.....	43
Figura 2.12: Widgets UI con conexión a Proceso ROS .....	44
Figura 2.13: Widgets Qt. En Qt Widget Gallery por QT Wiki 2019. ....	44
Figura 2.14 Código escrito en QML.....	45
Figura 2.15: Método de Newton-Raphson .....	46
Figura 2.16: Clase de la librería KDL para resolución de Problema Cinemático . En ChainIkSolverPos_NR_JL por orocos_kdl 2019.....	46
Figura 2.17: Uso del módulo IKFast para la Cinemática de robots.....	47

Figura 2.18: Proceso de ROS para gestionar la Visualización del espacio de trabajo .....	48
Figura 2.19: Espacios de Trabajo con Reuleaux. En Reuleaux: Robot base placement by reachability analysis por Makhal, A., et al .....	48
Figura 2.20: Modelo de laboratorio de robótica físico.....	49
Figura 2.21: Modelo del laboratorio Virtual de Robótica Industrial.....	50
Figura 2.22: Captura de pantalla de Software ABB RobotStudio .....	51
Figura 2.23: Representación de Links y Joints en un URDF .....	52
Figura 2.24: Estructura del lenguaje de marcado URDF .....	53
Figura 2.25 Robot 2 grados de libertad usando URDF.....	53
Figura 2.26: Paquete de Modelo de un Robot Kuka .....	54
Figura 2.27: Modelos de CAD en 3D .....	55
Figura 2.28: Pose 1 del Robot ABB IRB2600 a) Robot Studio b) Visualizador Plugin RVIZ.....	56
Figura 2.29 Pose 2 del Robot ABB IRB2600 a) Robot Studio b) Visualizador Plugin RVIZ.....	57
Figura 2.30: Pose 1 del Robot ABB IRB120 a) Robot Studio b) Visualizador Plugin RVIZ .....	58
Figura 2.31: Pose 2 del Robot ABB IRB120 a) Robot Studio b) Visualizador Plugin RVIZ.....	58
Figura 2.32 Diseño de interfaz principal por capa de software .....	59
Figura 2.33: Procesos a ejecutarse dentro de la interfaz principal .....	60
Figura 2.34: Diseño de la interfaz de Modelación de Robots. ....	61
Figura 2.35: Conceptos a desarrollar en interfaz de matemática y cinemática del robot.....	61
Figura 2.36 Proceso de Interacción con la interfaz de Matemática y cinemática .....	62
Figura 2.37: Objeto puesto a rotación bajo coordenadas de orientación o Ángulos de Euler XYZ.....	64
Figura 2.38 Aplicación de Algoritmo Denavit - Hartenberg .....	65
Figura 2.39: Interacción de Gazebo con ROS e interfaz de usuario.....	67
Figura 2.40: ros_control y su interacción con el mundo de Gazebo. Tomado de: <a href="http://gazebosim.org/tutorials/?tut=ros_control">http://gazebosim.org/tutorials/?tut=ros_control</a> .....	68
Figura 2.41: Diseño Interfaz Principal.....	70
Figura 2.42 Muestra de parte del código principal.....	70
Figura 2.43: Pantalla de Bienvenida al LVR .....	71
Figura 2.44 Muestra de la pantalla principal.....	72
Figura 2.45 Configuración de la librería PDF.Js en QML .....	72
Figura 2.46 Recurso Bibliográfico dentro del LVR.....	73
Figura 2.47 Propiedades del Módulo de Reproducción de Video.....	73
Figura 2.48: Contenido Multimedia en la interfaz del LVR.....	74
Figura 2.49: Clases en C++ y Componentes de QML .....	74
Figura 2.50: Código de la clase en C++ Registrada en QML .....	75
Figura 2.51: Tipos de Joints .....	76

Figura 2. 52: Palabras reservadas dentro de la interfaz .....	76
Figura 2.53: Vista de RViz Por Default .....	77
Figura 2.54: Representación secuencial del modelo de software de Modelación de Robots.....	78
Figura 2. 55: Nodos y Tópicos en Interfaz interactuando bajo ROS .....	79
Figura 2.56: Interfaz Modelación de Robots .....	79
Figura 2.57: Ejemplo de la edición de los parámetros de un robot con un script URDF .....	80
Figura 2. 58: Señales y Slots con funciones dentro del código de la interfaz principal.....	81
Figura 2.59: Herramientas del panel 3D de RViz .....	82
Figura 2.60: Herramientas de Visualización .....	82
Figura 2.61: Configuración del plugin Reuleaux .....	83
Figura 2.62: Reuleaux generando archivo para mostrar espacio de trabajo. ....	83
Figura 2.63: Espacio de Trabajo de un Robot Kuka.....	84

## **Anexos**

### **Anexo A**

Figura A.1: IDE QT-Creator Activación del Plugin Catkin, para el espacio de Trabajo.....	113
Figura A.2: Ubicación del espacio de Trabajo. ....	114
Figura A.3: Espacio de trabajo Creado.....	114



## **Lista de Tablas**

### **Capítulo I**

#### **Capítulo II**

Tabla 1.1: Mensajes ROS.....	12
Tabla 2.2: Comandos ROS.....	33
Tabla 2.3: Estructura de ROS.....	36
Tabla 2.4: Contenido de un Package .....	37
Tabla 2.5: Comandos Catkin.....	38
Tabla 2.6: Validación de Modelo ABB IRB2600 .....	56
Tabla 2.7: Validación de Modelo ABB IRB120 .....	57
Tabla 2.8 Conversión de coordenadas de posición y orientación.....	63
Tabla 2.9: Representación Matemática de Coordenadas de Posición y Orientación.....	63
Tabla 2.10: Tabla de Paquetes de la interfaz de Matemática y Cinemática de Robots.....	66
Tabla 2.11: Paquetes utilizado para la programación y simulación del Robot en Gazebo .....	69

### **Anexos**

#### **Anexo A**

Tabla A.1: Instalación de UBUNTU 16.04 Xenial .....	108
Tabla A.2: Instalación de ROS Kinetic.....	110
Tabla A.3 Creación del Espacio de Trabajo Catkin.....	111
Tabla A.4: Instalación del IDE QT- Creator.....	112
Tabla A.5: Instalación de Plugin ROS QT.....	112

## **INTRODUCCIÓN**

---

La robótica es uno de los campos de la tecnología que se desarrolla velozmente y encuentra cada día nuevas áreas de aplicación de tal forma que la clasificación de los robots debe ser ajustada constantemente. En la actualidad encontramos aplicaciones de la robótica en el campo personal y doméstico, servicios profesionales, investigación y desarrollo. Unos de los primeros campos donde los robots entraron en acción fue la industria en la cual destaca el uso de los mismos en el sector automotriz (soldadura y/o manejo de materiales). A pesar de que el uso de los robots en la industria data de la década de los 60s, en Nicaragua el uso de los mismos es relativamente bajo. El hecho mencionado tiene un impacto negativo en el desarrollo de la industria nicaragüense. Son pocas las industrias que poseen robots industriales y, de igual forma, son pocas las instituciones de educación superior que cuentan con la infraestructura adecuada, y el recurso humano, para la enseñanza e investigación de la robótica. Una de las razones es que un laboratorio físico, para experimentar en los diferentes aspectos asociados con los robots industriales, requiere de una inversión relativamente alta dado que es necesario garantizar el espacio físico, adquirir los robots y su mantenimiento.

La falta de infraestructura para el desarrollo e investigación de la robótica ha sido experimentada en la mayoría de las instituciones de educación superior latinoamericana muchas de las cuales han recurrido a la utilización laboratorios virtuales, diseñados e implementados por dichas instituciones o adquiridos en el mercado internacional. MATLAB, software ampliamente utilizado en el campo de las ingenierías, cuenta con un toolbox para robótica (Corke, 1996) mediante el cual se puede modelar y simular el comportamiento de un manipulador, sin embargo, el mismo tiene limitaciones. Simscape Multibody (antes llamado SimMechanics), de MATLAB y Simulink, permite la simulación de sistemas mecánicos en 3D, tales como robots. El software mencionado requiere de una licencia y el costo de la misma aumenta en dependencia del número de usuarios. También se puede utilizar el software de programación de robots, versión evaluación, de algunos fabricantes, tales como Robot Studio de ABB. Dicho

software, además de limitaciones temporales, solo puede ser utilizado en los robots fabricados por la empresa. Para trabajar con diferentes robots, es necesario adquirir y aprender los lenguajes de programación de cada uno de ellos.

En la actualidad se busca estandarizar el trabajo con los robots y una de las herramientas disponibles para tal fin es el middleware “Sistema Operativo para Robot (ROS, por sus siglas en inglés)” el cual se ha convertido en el estándar de facto a nivel industrial tanto así que ya existe una versión denominada ROS Industrial (2017). ROS (s.f.) es un middleware, open-source, para el desarrollo a gran escala de complejos sistemas robóticos. Se trata de una colección de herramientas, librerías y convenciones que tienen como objetivo simplificar la tarea de crear un comportamiento complejo y robusto en una amplia variedad de plataformas robóticas.

Para dar a conocer ROS y mostrar la importancia de este, para el **desarrollo** de la robótica, se **desarrollo** un laboratorio virtual de robótica (LVR) para el estudio de los fundamentos de la robótica industrial.

Para el desarrollo del laboratorio, además de ROS, se utilizaron herramientas de simulación tales como GAZEBO, visualizadores como RVIZ y RQT. La integración de los diferentes nodos se logró utilizando el lenguaje de programación C++, para la modelación de los robots se utilizó el formato de descripción unificado de robots (URDF, por sus siglas en inglés), y para la creación de ambientes y escenarios fue empleado el formato de descripción de la simulación (SDF, por sus siglas en inglés).

El laboratorio virtual cuenta con los recursos necesarios para que los estudiantes estudien y realicen prácticas relacionadas a la morfología de los robots, herramientas matemáticas necesarias para el estudio de los robots, cinemática de los robots y programación de manipuladores industriales. Un elemento de mucha importancia en el LVR, es el simulador que incorporará el cual permitirá manipular el modelo de un robot en un escenario particular, en respuesta a un programa utilizando instrucciones parecidas a las que incorporan los lenguajes de programación de fabricantes tales como ABB.

El laboratorio virtual de robótica cuenta con un manual en el cual es presentada información de los recursos disponibles en el LVR, de forma tal que los docentes puedan diseñar prácticas que permitan a los estudiantes afianzar los fundamentos de la robótica industrial, e información general sobre ROS y herramientas asociadas, a un nivel tal que el usuario podrá implementar un ambiente de desarrollo básico. El profesor podrá elaborar prácticas de laboratorio relacionadas con los cuatro aspectos mencionados utilizando para ello los modelos de robots presentes en el LVR. Por ejemplo, el profesor podrá diseñar una práctica para que los estudiantes apliquen el procedimiento de Denavit y Hartenberg para determinar la matriz de transformación homogénea. En su versión inicial, el LVR cuenta con dos guías para realizar algunas actividades que permitan a los futuros usuarios apropiarse del procedimiento necesario para utilizar efectivamente los recursos del LVR.

En el presente documento son presentados los principales aspectos relacionados con el desarrollo del laboratorio virtual, así como los resultados obtenidos.

# **OBJETIVOS**

---

## **Objetivo general**

- Desarrollar un laboratorio virtual para el estudio de los fundamentos de la robótica industrial utilizando, para su implementación, el sistema operativo para robots (ROS).

## **Objetivos específicos**

- Identificar las principales características/recursos/estructura de ROS enfatizando aquellas aplicables directamente a la robótica industrial.
- Identificar las herramientas de software requeridas, además de ROS, para el desarrollo del laboratorio virtual para el estudio de los fundamentos de la robótica industrial.
- Desarrollar la interfaz gráfica de usuario (GUI) del laboratorio virtual, según los requerimientos establecidos.
- Verificar la efectividad de los recursos del laboratorio virtual mediante la realización de dos prácticas de laboratorio.
- Elaborar un manual para el instructor donde se describa los recursos, y las características, del laboratorio virtual

## **JUSTIFICACIÓN**

---

El campo de la robótica ha tenido, principalmente en las últimas décadas, un desarrollo vertiginoso y está impactando de forma positiva, principalmente en países desarrollados, en áreas como la medicina, la industria, y la investigación, entre otras. En Nicaragua, país en vías de desarrollo, el uso de la robótica es relativamente bajo, sin embargo, dicha tecnología tendrá mayor presencia en el futuro cercano y por consiguiente es necesario contar con profesionales con las competencias requeridas para realizar efectiva y eficientemente las diferentes tareas asociadas con la aplicación, el desarrollo y la investigación de la robótica.

La formación de profesionales en el campo de la robótica requiere de recursos humanos e infraestructura apropiada para tal fin (Jara, 2011a). En Nicaragua pocas instituciones de educación superior cuentan con recursos básicos mínimos para la formación de los estudiantes en el campo de la robótica (Universidad Tecnológica La Salle, 2017), siendo uno de los principales obstáculos para tener mejores condiciones la imposibilidad de garantizar la alta inversión requerida para la adquisición de los robots, software, accesorios asociados, instalación y mantenimiento de acuerdo a un estudio de Castellanos, & Martínez (2010). Compañías como FESTO ofrecen Kits denominados modulares, para prácticas de un proceso automatizado utilizando un robot Mitsubishi, que cuesta alrededor de 41,500 euros.

En el campo industrial, muchos fabricantes ofrecen manipuladores industriales los cuales tienen precios altos y, además, cada uno ofrece su propio software para la programación de los robots (Owen, 2016). Lo anterior significa que los estudiantes o especialistas en robótica industrial tendrían que aprender a utilizar el software correspondiente al manipulador en turno lo cual es imposible lograr si no se cuenta con la infraestructura adecuada. Se han realizado intentos para estandarizar los aspectos relacionados con la programación de los robots, hacerla independiente del fabricante, y uno de los resultados más destacado en la última década es el middleware “Sistema Operativo para Robot” (ROS, por sus siglas en inglés). En

la actualidad es considerado el estándar de facto para la aplicación, desarrollo e investigación de la robótica. Una muestra de la importancia de ROS es que en el campo industrial crearon el ROS-Industrial.

El desarrollo de un laboratorio virtual en robótica contribuiría en la mejora de las condiciones requeridas para el estudio de los fundamentos básicos de esta ya que brindaría a los estudiantes, y docentes, una herramienta que podría ser utilizada en cualquier lugar y en cualquier momento.

El laboratorio virtual sería desarrollado tomando como elemento principal el middleware ROS lo cual, entre otras cosas, permitiría a los estudiantes experimentar con modelos de robots de diferentes fabricantes tales como ABB, KUKA, FANUC, entre otros.

La inversión en el desarrollo e implementación del laboratorio virtual siempre será inferior a la requerida para tener un laboratorio físico ya que la mayoría de las herramientas utilizadas, tales como C++, ROS, GAZEBO, Qt creator son de código abierto (Open Source).

Los principales beneficiarios de los resultados de este proyecto son los docentes y los estudiantes. Los primeros dispondrán de una herramienta a partir de las cuales podrán diseñar experimentos, con su guía apropiada, relacionados con los fundamentos básicos de los robots industriales. Los estudiantes, por su parte, contarán con una herramienta flexible, que podrán utilizar en cualquier momento y en cualquier lugar, la cual les posibilitará verificar los fundamentos teóricos relacionados con los robots industriales abordados en programas de asignatura relacionados así programar los robots para que realicen tareas básicas.

El laboratorio virtual de robótica desarrollado debe ser considerado como el primer paso hacia un laboratorio virtual con mayores recursos en el cual se pueda experimentar con diversos tipos de robots, no solo los antropomórficos. Lo anterior contribuiría considerablemente en el estudio del funcionamiento de los robots y sus aplicaciones y presentaría un espacio para el desarrollo e investigación en el campo de la robótica.

# CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO

---

Las instituciones académicas, principalmente las de educación superior (IES), buscan constantemente mejorar la calidad de la educación y una forma de hacerlo es integrando nuevas técnicas y herramientas orientadas a mejorar los resultados del proceso enseñanza-aprendizaje. En la actualidad, en muchas IES, a la tradicional clase presencial se suman otras formas de enseñanza-aprendizaje las cuales se fundamentan en las TIC, permitiendo de esta manera nuevas formas de enseñar, aprender, generar y compartir conocimiento.

Un recurso de mucho impacto en la formación de los futuros profesionales y cuya presencia crece día a día en los procesos de enseñanza aprendizaje es el laboratorio virtual (LV), el cual puede presentar altos niveles de flexibilidad y la inversión es muy inferior a la requerida para instalar un laboratorio real.

Uno de los campos en el cual el desarrollo y utilización de un laboratorio virtual reviste mucha importancia, dada la inversión alta requerida para tener un laboratorio físico, es el de la robótica en general y en particular, la robótica industrial.

En la introducción del presente documento se estableció que el trabajo de monografía propuesto pretende dar a conocer el middleware ROS, su importancia en el desarrollo de la robótica industrial, y dar muestra de sus posibilidades mediante el diseño y construcción de un laboratorio virtual que sirva de base para el estudio de los fundamentos de los manipuladores industriales tipo serie.

En los siguientes apartados se presentan los elementos teóricos-tecnológicos requeridos para el desarrollo del laboratorio virtual.

## 1.1 Tipos de laboratorios

La experimentación de un fenómeno físico, o mediante la simulación, requiere de entornos de trabajos que reúnan los equipos o herramientas necesarias para el desarrollo efectivo de una práctica. En los ambientes académicos podemos encontrar, en la actualidad, diferentes tipos de laboratorios

### **1.1.1 Laboratorio Físico**

Es ampliamente utilizado en universidades con modelos clásicos de enseñanza convirtiendo estos sitios de trabajo como el único sitio concebido para elaborar un experimento el cual involucra la presencia física tanto del tutor como del alumno. Cabe destacar que la interacción directa con los equipos apropiados de un laboratorio físico aporta una experiencia difícil de igualar debido a que los alumnos perciben los resultados de carácter palpable entrando en juego los cinco sentidos (Vista, tacto, audición, olfato e incluso, a veces el gusto) (Calvo, 2009a).

### **1.1.2 Laboratorio Virtual**

Es una alternativa al laboratorio físico y utiliza recursos computacionales haciendo uso de modelos matemáticos y recursos de visualización como modelos CAD y animaciones gráficas. Se pretende, mediante de este tipo de laboratorio, que el estudiante pueda estudiar el comportamiento de la realidad mediante el uso de modelos, sencillos o complejos, de la misma. Los recursos de un laboratorio virtual pueden ser ampliados en el tiempo permitiendo la realización de prácticas asociadas a temas de mayor complejidad.

### **1.1.3 Laboratorio Remoto online**

Nacen bajo la necesidad de dar acceso a los estudiantes a un espacio de trabajo, de forma online, que combina los recursos de un laboratorio físico con recursos de software. El estudiante accede al laboratorio por medio de una página web pudiendo de esta forma controlar los recursos disponibles y llevar a cabo el experimento de interés. Su aprovechamiento está basado en la accesibilidad por parte de un usuario en horarios flexibles.

### **1.1.4 Realidad virtual 3D**

Es la integración de recursos de hardware y software para acercar aún más al usuario a la experimentación de una teoría estimulando los sentidos tanto de la vista al exponerlos a entornos virtuales 3D y audición bajo altavoces con sonido envolvente.

En la actualidad se puede encontrar diferentes recursos para la enseñanza de la robótica Industrial tales como kits de robótica industrial, laboratorios virtuales de robótica de categoría libre o de pago para ejecutar cierta práctica. El desarrollo de un laboratorio remoto requiere contar con acceso a un laboratorio físico y enlazarlo a un servidor para que el estudiante pueda acceder vía remota garantizándole una plataforma amigable y multiplataforma como pueden ser los navegadores WEB. Candelas, F. et al. (2004) analizan las ventajas del uso de un laboratorio remoto ROBOLAB, proyecto desarrollado por ellos mismos bajo el nombre de grupo de investigación AUROVA. El proyecto utiliza herramientas gráficas para modelado y visualización de objetos 3D de un brazo robótico que coincide con el mismo modelo de un robot físico, permitiendo al estudiante realizar sus prácticas al observar y configurar el modelo virtual y una vez alcanzado un nivel de aprendizaje aceptable, proceder a interactuar con el robot físico utilizando la misma plataforma web. Ellos concluyen que al utilizar el laboratorio Remoto ROBOLAB “*La mayoría de alumnos prefieren disponer de un laboratorio en la universidad dónde trabajar con la ayuda de los compañeros y el apoyo didáctico del profesor, pero también hay muchos alumnos que reciben con agrado la opción de un laboratorio virtual que les ofrezca unos horarios flexibles en los que realizar los experimentos*”. (Candelas, et al, 2004b).

En resumen, un laboratorio virtual es un elemento importante en el proceso enseñanza-aprendizaje ya que destacan, entre otras, las siguientes ventajas según Calvo, et al (2009b):

1. El estudiante se familiariza con el experimento evitando acudir al aula sin conocimiento previo.
2. Comparación del comportamiento de modelos matemáticos ante una simulación permitiendo extraer sus propias conclusiones de cierta práctica.
3. Manejo de herramientas informáticas contemporáneas para la formación integral de un estudiante.

4. Repetitividad de los experimentos realizados por el estudiante que permitirá reproducir cuantas veces desee hasta consolidar el conocimiento.
5. Disminución de riesgos y accidentes que pueden ocasionar una mala práctica o configuración de un equipo físico.
6. Multiplicidad de experimentos simultáneos realizados ya que cada estudiante podrá ejecutar la práctica indicada en su computador asignado, además de esta forma se favorecen los procesos colaborativos como el de “Lluvia de ideas” al opinar cada alumno sobre su percepción adquirida al ejecutar la práctica.

Considerando lo anterior, se decidió, para dar a conocer la importancia y posibilidades de ROS, desarrollar un laboratorio virtual el cual tendrá a ROS como elemento integrador. Es importante destacar la inversión relativamente baja requerida para implementar el laboratorio virtual, la posibilidad de ampliación del mismo y la posibilidad que el mismo ofrecerá a los docentes para diseñar nuevas prácticas a partir de los recursos disponibles.

## **1.2 Sistema operativo para robot (ROS)**

El sistema operativo para robot (ROS), elemento fundamental del presente trabajo, es un middleware ampliamente utilizado en el mundo creciente de la robótica. Originalmente fue desarrollado en el 2007 en los laboratorios de Inteligencia Artificial de Stanford y en el 2008, cedieron el derecho de desarrollo al instituto de investigación de robótica Willow Garage (2010), donde la filosofía es proporcionar bibliotecas y herramientas libres para ayudar a los desarrolladores de software a crear aplicaciones para robots

En este trabajo monográfico, se promueve la importancia de ROS en el campo de la robótica y se hace mediante el diseño y construcción, utilizando los recursos proporcionados por este, de un Laboratorio Virtual de Robótica, en el cual será posible realizar experimentos sobre los fundamentos de la robótica industrial específicamente de los manipuladores industriales tipo serie.

Una característica importante de ROS es su código abierto (Open Source) lo que ha llevado al desarrollo, por muchos colaboradores a nivel mundial, de una amplia colección de herramientas, librerías y convenciones. Los recursos que ofrece ROS permiten el desarrollo, a gran escala, de sistemas robóticos complejos, tanto físicos como simulados.

Los desarrolladores de ROS han establecido un conjunto de convenciones y buenas prácticas en el desarrollo de software de forma tal que se fomente la reutilización de código para robots, trabajando sobre una arquitectura robótica totalmente sólida y funcional. De esta forma se garantiza, entre otras cosas, que el proyecto no sea fallido y que sus resultados satisfagan la calidad requerida en este tipo de trabajos.

### **1.2.1 Conceptos básicos de ROS**

El sistema operativo para robot (ROS) fue diseñado bajo una estructura distribuida y modular con el propósito de que los usuarios puedan usar los recursos requeridos según la aplicación a desarrollar. Es decir, el usuario puede seleccionar los recursos de software necesarios para implementar la solución.

En su operación, ROS presenta una red de **procesos** que se ejecutan simultáneamente en una estructura **peer-to-peer** donde cada nodo o elemento del sistema puede actuar al mismo tiempo como cliente y como servidor. Para una aplicación distribuida de ROS se requiere que los nodos peer to peer estén sincronizados bajo un middleware el cual genera un orden temporal para los eventos generados en el sistema, además de utilizar la comunicación XML/RPC que define la información de registro de cada nodo al ROSMaster, una vez registrado los nodos se procede a ejecutar la comunicación peer to peer entre los nodos utilizando el protocolo TCP/IP y, entre los muchos conceptos básicos relacionados en la misma, destacan los siguientes:

### 1.2.1.1 Nodos (Nodes)

Son procesos que realizan cálculos. Por ejemplo, en un sistema robótico, un nodo realiza la planificación de la trayectoria y otro puede suministrar una vista gráfica del sistema.

### 1.2.1.2 Mensajes (Messages)

Los nodos se comunican entre ellos enviándose mensajes. Un mensaje es simplemente una estructura de datos, que contiene campos de un solo tipo de datos. Tipos primitivos de datos (enteros, booleanos, punto flotante, etc.) son soportados, así como lo son arreglos de tipos primitivos.

*Tabla 1.1: Mensajes ROS*

Grupo de Mensajes	Descripción del Tipo de mensaje
<b>actionlib_msgs</b>	Mensajes para interacción con un servidor Acción y cliente Acción
<b>geometry_msgs</b>	Mensajes Para manejo de datos geométricos con puntos, vectores y Estados o poses de orientación por coordenadas.
<b>sensor_msgs</b>	Mensajes usados para conectar Sensores, incluyendo cámaras y laser para scanner PCL.
<b>trajectory_msgs</b>	Mensajes para definir la trayectoria de los robots, ya sea cinemática, dinámica o Posición y orientación en un espacio.

### **1.2.1.3 Tópico (Topic)**

El tópico es un nombre usado para identificar el contenido de un mensaje. Un nodo envía un mensaje publicándolo en un tópico dado. Los mensajes son enrutados vía un sistema de transporte con una semántica de publicación/suscripción. es un nombre utilizado para identificar el contenido de un mensaje. Un nodo que está interesado en cierta clase de datos debe suscribirse al tópico apropiado.

### **1.2.1.4 Maestro (master)**

El master proporciona los elementos necesarios para que los nodos se encuentren los unos a los otros, intercambien mensajes o invoquen servicios.

### **1.2.1.5 Servicios (services)**

Es un modelo de comunicación cliente-servidor, es una manera en el que los nodos se pueden comunicar. Estos permiten que se envíen solicitudes y se reciban respuestas

### **1.2.1.6 Bolsas (bags)**

Formato para guardar y reproducir datos de un mensaje proveniente de un nodo de ROS. Son un importante mecanismo para almacenar datos, tales como datos de sensores, que son difíciles de obtener pero que son necesarios para el desarrollo y prueba de algoritmos.

La arquitectura básica de comunicación de ROS, usando 3 nodos como ejemplo simplificado es mostrada en la figura 2.1. Para establecer comunicación con diferentes nodos es necesario la utilización de registros, cuyos nombres son suministrados por el maestro.

Como se muestra en la Figura 2.1 el Nodo 1, el Nodo 2 y el Nodo 3 se registran al Máster usando comunicación XML/RPC el cual, luego de conocer cada nodo registrado, permite a los diferentes nodos intercambiar la información entre ellos utilizando para esto el protocolo TCP/IP.

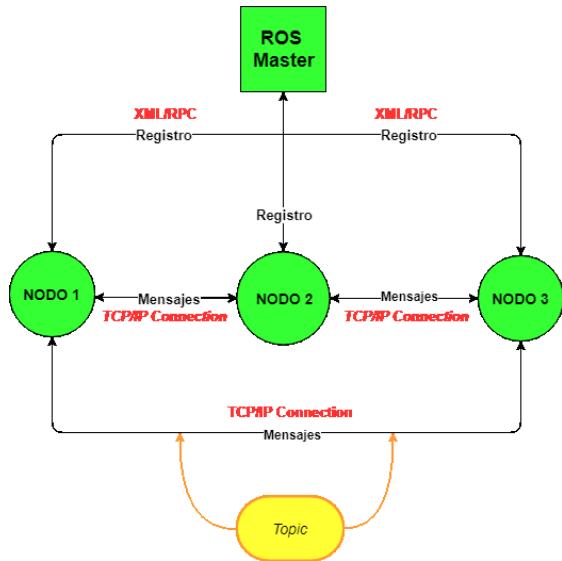


Figura 1.1: Esquema de Funcionamiento de la Arquitectura de ROS

Dado que cada nodo puede compartir múltiples mensajes, a estos se les clasifica como tópicos (topics) lo cual permite la centralización de información proveniente de varios procesos de un sistema robótico ya sea este físico o simulado. En la figura 2.2 podemos observar un comportamiento básico de un nodo y sus tópicos.

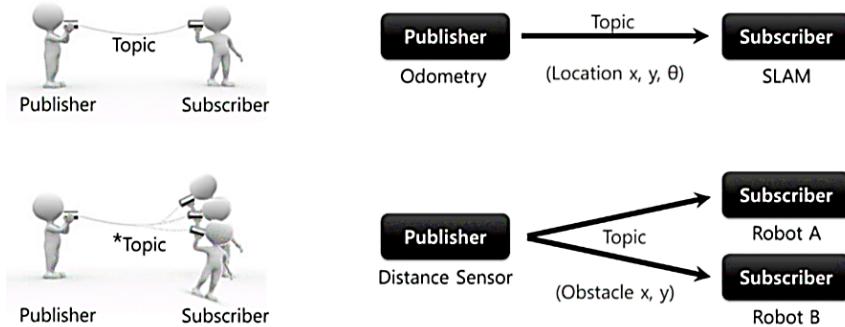
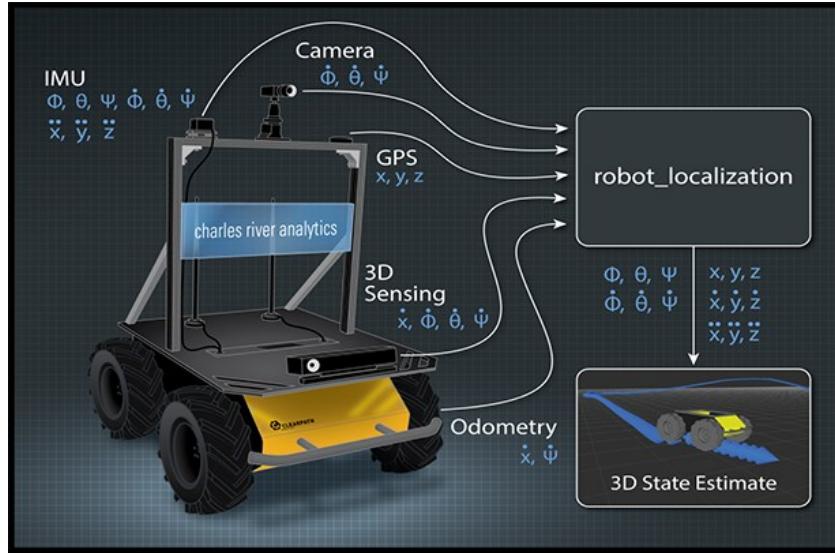


Figura 1.2: Comunicación utilizando Tópicos. En Topics por ROBOTIS Co., Ltd 2017..

Un ejemplo del funcionamiento de la arquitectura de ROS es mostrado en la figura 2.3 en la cual se identifica el **nodo** “robot\_localization.” El nodo mencionado recibe mensajes desde varios nodos bajo los **tópicos**: IMU, Camera, GPS, Detección 3D (Sensing 3D) y odometría (odometry), los datos suministrados en los **mensajes** son procesados por el nodo y como resultado comparte bajo un único tópico, y

varios mensajes, al visualizador 3D RVIZ las coordenadas de localización del objeto físico para que este pueda ser representado de manera virtual.



*Figura 1.3: Nodo robot\_localization recibiendo tópicos de un robot físico y mostrando su localización en el ambiente virtual. En robot\_localization por Charles River Analytics Inc 2017.*

Un nodo podemos considerarlo como un ejecutable dentro del paquete de ROS y utiliza la librería cliente, lista de nodos disponibles de ROS, para comunicarse con otros nodos, y estos a su vez se les configura para publicar o suscribirse a un tópico, o algunos procesos de ROS tales como servicios o almacenamiento de datos (Bags).

### 1.2.2 Librerías de ROS

El sistema operativo para robots (ROS) presenta una serie de características que lo hacen atractivo, para las personas dedicadas a la robótica, a la hora de diseñar e implementar sistemas basados en robots. Una de las características principales es que puede acceder a una amplia colección de librerías las cuales varían de acuerdo con la distribución de ROS (turtle, kinetic, etc.) con la que se desee trabajar. Las librerías de las distribuciones más recientes cuentan con librerías con códigos más estables e incorporan nuevas librerías probadas y recomendadas por la comunidad ROS.

Para implementar un nodo en ROS se pueden utilizar diferentes librerías tales como roscpp para C++ o rospy para Phyton.

ROS dispone de las librerías necesarias para la implementación de las actividades que deben ser desarrolladas en un sistema robótico tales como el intercambio de mensajes entre nodos o la estructuración de datos para descripción de trayectorias.

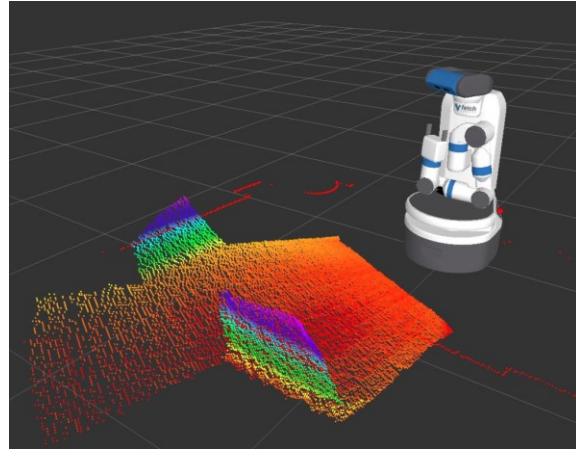
En el desarrollo del trabajo monográfico se utilizó la distribución (versión) Kinetic dado que es una de las más estables hasta la fecha.

### **1.2.3 Herramientas de visualización de datos en ROS**

Un elemento importante en cualquier laboratorio virtual de robótica es la posibilidad de visualizar el comportamiento del modelo de un robot en un escenario dado. También es fundamental que el mismo cuente con los recursos necesarios para facilitar el análisis de los datos generados por el sistema robótico bajo estudio. El sistema operativo para robots (ROS) dispone de una serie de herramientas para la visualización de los mensajes de los sistemas robóticos ya sean estos físicos o virtuales. Entre el sinnúmero de herramientas disponibles mencionamos RVIZ, RQT, y Movelt, nodos en el sistema de suscripción de ROS con sus tópicos y servicios para permitir la entrada y salida de los datos a procesar. Las mismas herramientas **mencionadas son utilizadas** en el desarrollo del laboratorio virtual propuesto.

#### **1.2.3.1 RVIZ**

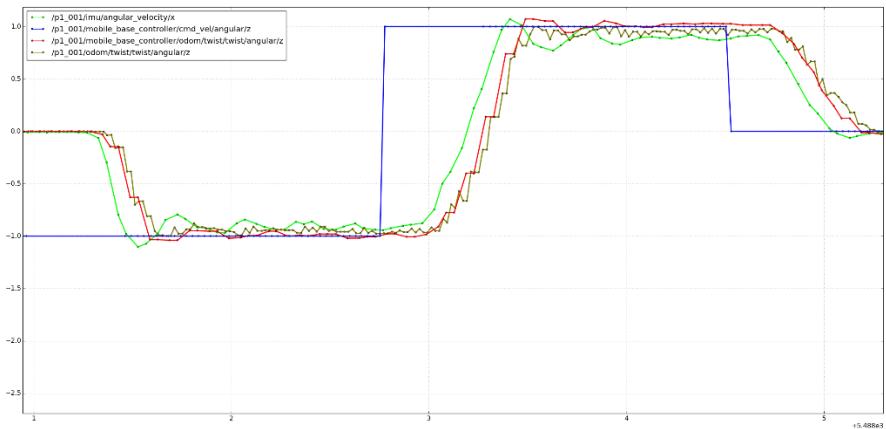
Es una herramienta de visualización 3D que permite combinar en una misma pantalla modelos de robots, datos de sensores (cámara, láser, etc.) y otros datos provenientes de mensajes 3D. **RVIZ es utilizado** en el desarrollo del laboratorio virtual principalmente para visualizar la morfología y estudiar la cinemática de los robots. La figura 2.4 muestra una imagen generada utilizando RVIZ.



*Figura 1.4: RVIZ y visualización de modelo de robot y datos provenientes de mensajes 3D.*

### 1.2.3.2 RQT

La herramienta rqt ofrece varios plugins, entre los cuales destacan ‘rqt\_image\_view’, ‘rqt\_graph’, ‘rqt\_plot’ y ‘rqt\_bag’, los cuales pueden ser utilizados para la introspección y visualización de datos provenientes de procesos de ROS. Por ejemplo, si es necesario visualizar los mensajes provenientes de una cámara en un sistema robótico, podríamos utilizar el plugin rqt-image\_view. rqt expone los nodos, y las conexiones entre ellos, lo que permite entender la estructura del sistema, su funcionamiento, así como su fácil depuración. En la figura 2.5 se muestra el resultado de utilizar rqt\_plot para visualizar los datos provenientes de un nodo.



*Figura 1.5: Gráfico de línea XY de datos provenientes de nodos*

En el laboratorio virtual de robótica RQT se utilizó para graficar la estructura de datos correspondiente a la posición del robot durante su movimiento.

### 1.2.3.3 Movelt!

Es una herramienta de software, escrita en C++, que permite la planeación de trayectorias para un robot industrial, así como la visualización de los datos y del modelo 3D del mismo, valiéndose de un plugin que es incorporado a la aplicación de visualización de datos RVIZ. Actualmente, Movelt (s. f.) es utilizado en diversas industrias para hacer la planeación de las trayectorias para diferentes tipos de manipuladores industriales, adoptando la visión de ROS de facilitar la programación de diferentes tipos de robots con los mismos recursos de Software.

Al sistema en desarrollo se le puede suministrar mayor funcionalidad al utilizar ROS ya que el mismo permite la integración y utiliza la información generada por aplicaciones externas de código abierto muy populares tales como GAZEBO y OpenCV. Por ejemplo, es posible utilizar OpenCV para hacer reconocimiento de imágenes y tomar decisiones, a partir de los datos suministrados. Más adelante en el documento se presentarán las características de GAZEBO dado que es el simulador que se incorporo en el LVR en la practicas de programación del robot.

### 1.2.4 Lenguajes de programación soportados por ROS

En el desarrollo del software para una aplicación de robótica, ROS permite el uso de distintos lenguajes de programación. De manera oficial soporta Python, C++ y LISP. Java podría ser soportado en el futuro, pero en la actualidad se encuentran en una fase experimental, apoyada por Google. De igual forma C# se encuentra en una fase experimental utilizando UNITY 3D, el cual es un motor de video juegos multiplataforma que permite simular robots importando el URDF como un GameObject en UNITY3D y obtener de este una simulación más realista con el renderizado de UNITY3D.

Con ROS es posible utilizar nodos creados en diferentes lenguajes de programación tales como Phyton y C++ y garantizar el intercambio de información entre estos.

En el desarrollo de la GUI y el intercambio de información entre los nodos ROS se utilizará el lenguaje C++ y el compilador CMake el cual fue diseñado para construir, probar y empaquetar software. CMake es el compilador oficial soportado por la comunidad ROS y el mismo desplazó al anterior compilador llamado rosbuild.

El ambiente integrado de desarrollo Qt-Creator posee un plugin para ROS (ROS Industrial, 2016) que cuenta con los recursos necesarios (por ejemplo, templates) para crear nodos, servicios, y archivos URDF, entre otros. Qt-Creator permite al desarrollador construir los recursos de software necesarios, desde el IDE, para un sistema robótico.

### 1.3 Laboratorio virtual para robótica industrial

En una institución de educación superior, que dispone de un laboratorio físico para la enseñanza de la robótica, el robot es parte de un escenario que simula un ambiente industrial y las prácticas generalmente están relacionadas con la programación del robot para que realice una tarea determinada. El sistema no presenta la flexibilidad necesaria para que los estudiantes mejoren su comprensión acerca de los fundamentos de la robótica industrial. De hecho, aprenden a programar el robot utilizando el lenguaje específicamente diseñado para este.

El laboratorio virtual para robótica que se ha desarrollado contempla la incorporación de los recursos necesarios para que los estudiantes **estudien o realicen** experimentos relacionados con temas tales como la morfología del robot, la cinemática del robot, la programación de robots de diferentes fabricantes independientemente del lenguaje específico desarrollado para cada uno. Se incorporarán recursos que permitirán al estudiante entender las herramientas matemáticas utilizadas en el campo de la robótica industrial, específicamente manipuladores industriales tipo serie.

En el desarrollo de software es común el uso de los términos Backend y Frontend los cuales aportan una perspectiva de la clasificación de tipo de Software a utilizar en la construcción del propio laboratorio virtual, **se uso ROS** para manejo de datos en Backend y el uso de librerías de software libre para desarrollar la GUI del lado de Frontend.

En el LVR el estudiante, para la realización de los experimentos, **puede utilizar** modelos de robots de fabricantes tales como ABB o KUKA. De igual forma, **cuenta** con las herramientas y la guía para desarrollar sus modelos propios.

Los principales elementos del laboratorio virtual son:

- Interfaz gráfica de usuario (GUI) para (interacción, programación, visualización, etc.)
- Modelos de robots industriales de ABB, KUKA, y DELTA
- Escenarios para la realización de tarea específicas
- Documentación sobre aspectos fundamentales sobre robótica industrial
- Otros

La interacción entre los diferentes elementos del laboratorio virtual es garantizada mediante el middleware ROS.

A continuación, son presentados algunos de los conocimientos o recursos tecnológicos requeridos para el desarrollo del LVR, específicamente para la implementación de la interfaz gráfica de usuario (GUI) y la construcción de algunos recursos para el estudio de los fundamentos de los manipuladores industriales.

### 1.3.1 Interfaz gráfica de usuario (GUI)

Una interfaz gráfica de usuario (GUI, por sus siglas en inglés) facilita la explotación de una aplicación mediante la incorporación de elementos destinados para tal fin. La GUI debe comportarse de una manera comprensible y predecible, de modo que un usuario sepa qué esperar cuando realiza una acción. La interfaz gráfica de usuario del **laboratorio virtual cuenta con los elementos necesarios** (botones, sliders, editor de texto, pantalla de visualización, etc.) para realizar las prácticas sobre los fundamentos de la robótica industrial, así como para acceder a documentos de interés tales como libros, guías de laboratorio, entre otros. **La GUI está diseñada de tal forma** que el estudiante podrá usar los recursos de manera transparente sin necesidad de tener que configurar aspectos básicos de ROS tales como su inicialización y el lanzamiento de nodos.

En la actualidad existen muchos lenguajes que pueden ser utilizados para desarrollar **una interfaz de usuario** y entre ellos destacan C++, C#, Java, Phyton,

Visual Basic. Un criterio para utilizar un lenguaje en particular es que el mismo sea multi-plataforma ya que la interfaz podría ser utilizada bajo diferentes sistemas operativos.

Hoy día están disponibles un sinnúmero de ambientes integrados de desarrollo (IDE, por sus siglas en inglés) que facilitan la programación ya que aglomeran todas las herramientas necesarias tales como conjuntos de librerías, preprocesador, depurador, y compiladores. Entre los IDEs más conocidos destacan, entre otros, Visual Studio, Eclipse, NetBeans, CLion, y Qt Creator. Para la construcción de la GUI del laboratorio virtual de robótica industrial **se utilizó el IDE Qt Creator**, debido, principalmente, a que este posee un plugin de soporte para ROS.

Qt Creator se utilizó para crear las aplicaciones o nodos de ROS **y se exploró las capacidades** que posee QT Creator para la creación de aplicaciones de escritorio. Qt Creator cuenta con QML, un estándar propio del IDE, que permite crear aplicaciones dinámicas y más elaboradas capaces de incorporar recursos WEB. Esa línea de **creación se utilizó para incorporar** un lector de PDF con el objetivo que los estudiantes dispongan en el LVR de documentación de interés tales como libros o guías de laboratorio.

En el desarrollo de la GUI del **LVR se utilizaron los widgets** de Qt Creator (slider, botones, etc.) los cuales están escritos en C++. Esta línea de creación es muy importante para lograr la visualización en el LVR ya que es muy fácil incorporar las librerías de ROS, escritas en C++, a una aplicación utilizando widgets. Un **ejemplo es el desarrollo de una** aplicación de escritorio personalizada que se acople a los requerimientos del LVR al incorporar las librerías de RVIZ para visualizar los modelos de los robots.

Es importante mencionar que en el laboratorio **virtual se realizan múltiples procesos en el Backend**, con el objetivo de garantizar la transparencia en el uso de los sus recursos por los usuarios, que darán inicio a la ejecución de las interacciones en la interfaz de usuario tales como la visualización de los robots y datos, programación y simulaciones de los robots. **Dichos procesos están basados**

en nodos que son lanzados o eliminados de acuerdo con la lógica implementada en el propio LVR.

### 1.3.2 Fundamentos de la robótica industrial.

El laboratorio de robótica **virtual que se desarollo** tiene un alcance limitado ya que de los temas considerados en un curso básico de robótica industrial el mismo solo contempla recursos para la experimentación en temas como herramientas matemáticas, morfología del robot, cinemática y programación de robots. **El trabajo pretende mostrar la potencialidad del sistema operativo para robots (ROS) y lo hace poniendo en marcha el diseño, la programación y el uso** del LVR. La información suministrada acerca de ROS y el laboratorio propuesto deben servir de base para ampliar los recursos de este.

#### 1.3.2.1 Morfología del robot

**El laboratorio virtual de robótica cuenta** con modelos creados utilizando URDF y los mismos podrán ser visualizados con la herramienta RVIZ. El estudiante puede visualizar el espacio de trabajo, para una morfología dada, con la ayuda de plugins desarrollados para la visualización. Interactuar con diferentes tipos de articulaciones ya sean prismáticas o de revolución y robots de diferentes grados de libertad. El estudiante tendrá la posibilidad de experimentar con modelos construidos por él mismo utilizando el formato URDF.

**RVIZ** es una abreviación para ROS visualización y es una herramienta poderosa para la visualización en 3D. Permite al usuario ver el modelo simulado del robot, obtener información de los sensores del robot, y reproducir la información obtenida de los sensores. Mediante la visualización de lo que ve y hace el robot el usuario puede eliminar los errores de la aplicación robótica desde entradas de sensores hasta acciones planificadas o no planificadas.

### 1.3.2.2 Herramientas matemáticas

El modelado cinemático de un robot busca las relaciones entre las variables articulares y la posición (expresada normalmente en forma de coordenadas cartesianas) y orientación del extremo del robot (expresada como matrices de rotación, ángulos de Euler o algún otro de los métodos establecidos para tal fin).

Entender las herramientas matemáticas utilizadas para determinar la localización espacial de los diferentes elementos de un robot industrial, especialmente del efecto final, presenta cierta dificultad a los estudiantes, principalmente cuando se utiliza solamente la pizarra para su explicación. Para contribuir al entendimiento y aplicación de dichas [herramientas el laboratorio virtual de robótica incorpora los](#) recursos necesarios para que los estudiantes puedan analizar la posición de un objeto utilizando coordenadas esféricas y cilíndricas, así como la orientación de este mediante la matriz de rotación, los ángulos de Euler, y los cuaternios. Las operaciones requeridas para el desempeño de los recursos estarán soportadas por la librería TF2, disponible para C++ y Phyton, propia de la distribución de ROS, que permite hacer conversiones de sistemas de coordenadas.

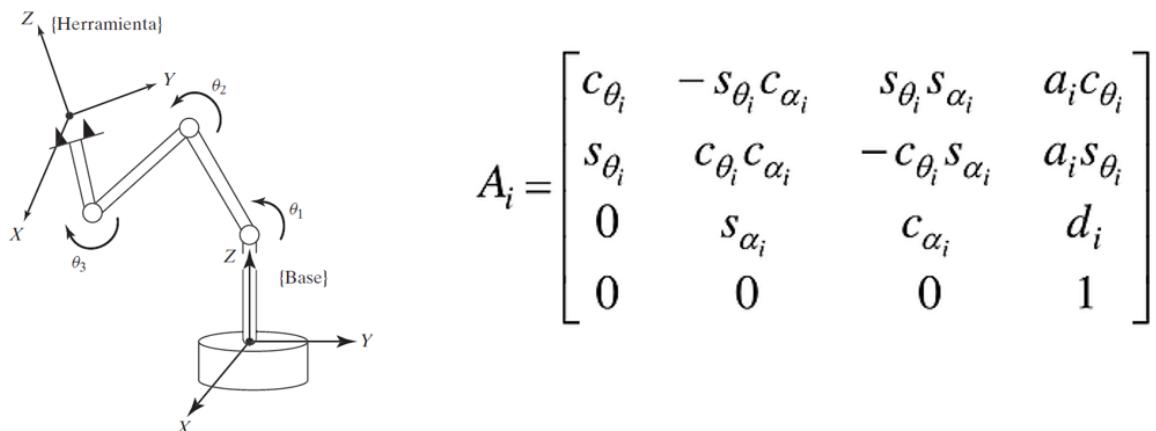


Figura 1.6: Modelo de robot, sistemas de referencia. En “Robótica” (P.6), por J. J. Craig, 2006

### 1.3.2.3 Cinemática directa e inversa

La cinemática del robot estudia el movimiento de este con respecto a un sistema de referencia sin considerar las fuerzas que intervienen. Así, la cinemática se

interesa por la descripción analítica del movimiento espacial del robot como una función del tiempo, y en particular por las relaciones entre la posición y la orientación del extremo final del robot con los valores que toman sus coordenadas articulares. Dentro de la cinemática se estudian la posición, velocidad, aceleración y todas las derivadas de mayor orden de las variables de posición (respecto al tiempo o a cualquier otra variable).

En muchas ocasiones es necesario conocer en cuál posición se encontrará el efecto final del robot dadas ciertas posiciones de las articulaciones y dicho problema es abordado por la cinemática directa. En otras ocasiones es necesario conocer cuál debe ser la posición de las articulaciones para que el efecto sea ubicado en una posición deseada. El último problema es abordado por la cinemática inversa. La *figura 2.7* muestra la relación entre las variables para cada uno de los tipos de cinemática.



*Figura 1.7: Cinemática directa e inversa En “Fundamentos de robótica” (P.119), por A. Barrientos et al, 2007*

El laboratorio virtual de robótica que se propone cuenta con recursos que permitirán al estudiante realizar experimentos sencillos que le ayudarán a comprender las características de la cinemática directa e inversa.

A partir del modelo de un robot, construido utilizando el formato URDF, es posible obtener toda la información necesaria de la estructura de este utilizando la librería KDL. La información obtenida al utilizar el KDL en combinación con la información suministrada por el usuario (por ejemplo, los ángulos de los joints) mediante ciertos widgets de la GUI permiten manipular y/o determinar la posición del robot. La librería KDL también puede ser utilizada para determinar la matriz de transformación homogénea la cual es utilizada para determinar la posición y

rotación del efecto final del robot. Los datos obtenidos serán visualizados mediante widgets del GUI desarrollados para la representación de datos.

#### 1.3.2.4 Programación y simulación del robot

En la robótica, en general, uno de los más aspectos de mayor importancia es el relacionado con la programación de los robots. Durante la ejecución de un programa se interacciona con la memoria del sistema, leyendo y actualizando el contenido de las variables utilizadas en el programa; con el sistema de control cinemático y dinámico del robot, encargados de dar la señal de mando a los accionamientos del robot a partir de las especificaciones del movimiento que se les proporciona; y con las entradas-salidas del sistema, consiguiéndose así la sincronización del robot con el resto de las máquinas y elementos que componen su entorno.

El sistema de programación es, por tanto, la herramienta con que cuenta el usuario para acceder a las diversas prestaciones del robot, existiendo una relación directa entre las características y posibilidades del sistema de programación y las del robot en sí mismo.

La programación puede ser guiada o textual. Es importante destacar que en la actualidad es muy frecuente que los sistemas de programación de robots tiendan a combinar los dos modos básicos (guiado y textual), permitiéndose desarrollar el programa mediante la escritura de las instrucciones, y utilizando la posibilidad de guiado en línea en aquellos momentos en que sea necesario. Sistemas como RAPID de ABB, VAL II de Staübli y V+ de Adept Technology son ejemplos de esta ambivalencia.

Uno de los problemas relacionados con la programación de los robots es que no existe un estándar y el programador debe aprender el lenguaje específico para los robots de diferentes fabricantes. ROS brinda la posibilidad de programar robot de diferentes fabricantes desde el mismo entorno.

Supongamos que es necesario que dos robots de diferentes fabricantes, pero la misma morfología, deben seguir la misma trayectoria. En el ambiente de ROS, es posible escribir mensajes de ROS (que contiene la posición, velocidad, aceleración, etc., de cada articulación del robot), escritos en C++ o Python. El driver de cada robot, una vez recibido el mensaje, generará los comandos para que su robot siga la trayectoria indicada.

El laboratorio virtual de robótica permite al usuario escribir un programa (script, programación textual) que adoptará ciertas convenciones, utilizadas en el software de programación de robots de ABB Rapid, para que uno de los robots (modelos disponibles en el LVR) realice una tarea sencilla.

Una forma mediante la cual podemos verificar si el robot realiza la tarea indicada es la simulación. En la actualidad existen muchos simuladores, sencillos y complejos, para robots. También podemos clasificarlos en comerciales y de código libre.

Entre los comerciales destaca V-Rep el cual es un simulador dinámico con un entorno de desarrollo integrado que permite desde su interfaz lenguajes de programación tales como C, C++, Phyton, entre otros.

**V-Rep** es un simulador con entorno de desarrollo integrado donde cada objeto/modelo se puede controlar individualmente a través de un script de programación que puede ser escrito usando lenguajes de programación como C/C++, Python, Java, Lua, Matlab or Octave, V-REP se utiliza para el desarrollo rápido de algoritmos, simulaciones de automatización de fábricas, prototipado rápido y verificación y educación relacionada con la robótica.

De los simuladores open-source uno de los más utilizados es GAZEBO, el cual provee simulaciones dinámicas donde los robots pueden interactuar con el entorno (pueden coger, empujar, rodar, deslizarse por el suelo), capacidad de manipular las características del entorno tal como la gravedad del mundo virtual.

*Tabla 1.2: Comparación Técnica entre Simuladores.*

Simulador	Lenguaje de Programación	Formatos Soportados	Extensión de Software	Middleware	GUI
Gazebo	C++	SDF/URDF	Plugins C++	ROS, Player.	Si
V-Rep	LUA	Object, STL, Collada, URDF	API, Addons, Plugins	Sockets, ROS	Si
Webots	C++	WBT	Plugins C++ , API	ROS, URBI, NaoQI	Si

**Gazebo** es simulador dinámico 3D que tiene la habilidad para simular poblaciones de robots, de forma exacta y eficiente, en ambientes complejos internos y externos. Aunque similar a máquinas de juego, Gazebo ofrece una simulación física a un grado de fidelidad mayor, un conjunto de sensores, e interfaces tanto para programas como para los usuarios. Usos típicos de Gazebo incluyen:

- Prueba de algoritmos robóticos
- Diseño de robots
- Realización de pruebas de regresión con escenarios realísticos.

Algunas características claves de Gazebo:

- Máquinas físicas múltiples
- Una librería de modelos de robots y ambientes.
- Una amplia variedad de sensores

Aunque ambos simuladores tienen la posibilidad de comunicarse utilizando ROS se ha seleccionado GAZEBO como el simulador a incorporar en el LVR debido a que este es open-source. El estudiante podrá observar en el simulador GAZEBO

el comportamiento del modelo del robot en respuesta al programa (script) escrito por el usuario. El script incorporará el conjunto de instrucciones las cuales serán procesadas por un nodo el cual enviará a GAZEBO, utilizando el pluging de conexión correspondiente, los mensajes apropiados para lograr el movimiento de las articulaciones del robot en el mundo.

**SDF** es un formato XML utilizado para describir objetos y ambientes para simuladores de robots, visualización, y control. SDF tiene capacidad para describir todos los aspectos de un robot, objetos estáticos y dinámicos, iluminación, terreno y también la física. [En el laboratorio virtual el lenguaje SDF se](#) utiliza para modelar los escenarios de trabajo en el ambiente de Gazebo.

Podrán ser utilizados los siguientes parámetros:

- ✓ **Escena:** Iluminación ambiental, propiedades del cielo, sombras.
- ✓ **Física:** Gravedad, paso del tiempo, motor de la física.
- ✓ **Modelos:** Colección de enlaces, objetos de colisión, articulaciones y sensores.
- ✓ **Luces:** Punto, espacio y fuentes de luz direccionales.
- ✓ **Plugins:** plugins soportado por gazebo, plugins del mundo, del modelo, del sensor y del sistema.

## 1.4 Uso del laboratorio virtual de robótica industrial

Los diferentes elementos involucrados en el uso, y posible ampliación del laboratorio virtual, son mostrados en la figura 2.8. El laboratorio virtual incluye un manual de usuario cuyo objetivo es presentar al usuario los recursos disponibles y un par de guías de laboratorio para mostrar cómo utilizarlos. Como se aprecia en la figura 2.7, el docente podrá, partiendo de los temas relacionados con los fundamentos de la robótica industrial que desee desarrollar y de los recursos disponibles en el laboratorio, elaborar las guías que utilizarán los estudiantes para realizar las actividades de estudio o las prácticas de laboratorio correspondientes.

Se pretende, como parte del trabajo monográfico, desarrollar un taller, para los docentes interesados, con el objetivo de brindarles los detalles de diseño y herramientas utilizadas en la implementación del LVR para que tengan una base para la ampliación de los recursos de este.

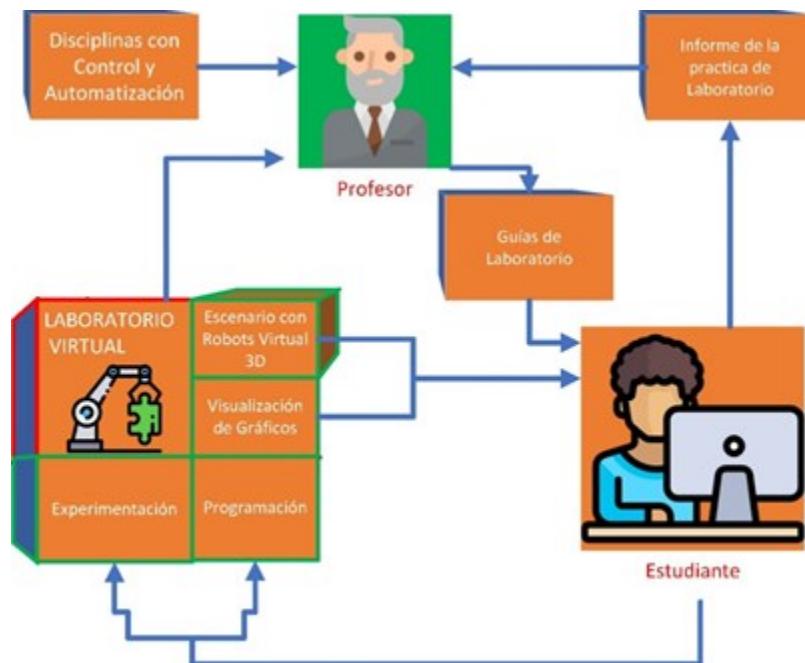


Figura 1.8: Modelo de utilización del LVR.

## **CAPÍTULO II: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL LABORATORIO VIRTUAL DE ROBÓTICA INSDUSTRIAL**

En este capítulo son presentados los aspectos técnicos relacionados con el diseño e implementación del software desarrollado, API y Plugins retomados para el desarrollo del Laboratorio virtual de Robótica, cumpliendo los requerimientos planteados en la sección 1.4 para la utilización del LVR.

### **2.1 Recursos de software**

A continuación, se explicará el proceso de adquirir los recursos de software necesarios para lograr el desarrollo del laboratorio virtual, se detallará la importancia de estos y enfatizando en aspectos particulares que son necesarios dominar para trabajar con el sistema operativo Ubuntu, ROS, el IDE y librerías de importancia para este trabajo monográfico.

#### **2.1.1 Sistema operativo Ubuntu**

El Sistema operativo sobre el que se desarrolló este trabajo monográfico es una distribución de Linux, precisamente la distribución Ubuntu 16.04 LTS (Long Terminal Support), es libre y con compatibilidad con la versión más estable de ROS, la distribución Kinetic LTS cabe destacar que estas versiones se mantiene con actualizaciones hasta el 2020, actualmente está disponible la versión estable ROS Melodic pero exclusivamente no hace falta migrar a este versión debido a que todos los recursos de software que se necesitaran para este trabajo están bajo la versión instalada Kinetic (Ver anexo A1 Instalación de Ubuntu).

Debido a que el sistema operativo Linux no es ampliamente utilizado, representa una fragilidad para esta propuesta de trabajo que pretende sea usada (adoptada) en las aulas de clases de la Universidad Nacional de ingeniería, esto porque actualmente el sistema operativo dominante en las computadoras personales es Windows, es sabido que para acceder a los recursos de software en las plataformas Linux es necesario tener un cierto manejo y conocimiento de líneas de comandos (Shell) en Linux para movernos por el entorno, esto representa una

falta de popularidad comparada con Windows, de tal forma es necesario dar a conocer que esto no representara un problema dentro de poco, en los trabajos desarrollados con ROS ya que Microsoft anuncio la colaboración con ROS en adoptar la compatibilidad del Middleware ROS a Windows (Microsoft 2018), de esta forma este trabajo monográfico posee la capacidad de ser actualizado a una versión en Windows.

Por lo tanto, dentro del desarrollo de este trabajo fue de vital importancia conocer el entorno Linux para entender cómo se realizan las compilaciones, ejecutar comandos con debida destreza por consola para manipular parámetros de manera rápida y como mostrar resultados de procesos por consola.

### 2.1.2 ROS



Figura 2. 1 Logo del sistema operativo para robots

A como se mencionó en la sección 1.2 ROS se define como un middleware para el desarrollo software de robot. La curva de aprendizaje que toma aprender ROS es algo sinuosa al principio, pero algo que caracteriza a ROS de otros middleware como Orocó, playerStage, etc es que tenemos a nuestra disposición multitud de recursos que nos brinda la propia comunidad, de hecho ser parte de la comunidad complementa la filosofía que dio origen a ROS (Ver sección 2.2) de no reinventar la rueda al compartir ideas de cómo hacer robótica bajo el estándar de trabajo basado en un ecosistema ROS con más de 3,000 paquetes de software, una infraestructura de comunicación modular basada en nodos, tópicos, o mensajes de ROS, en su página cuenta con foros o la wiki de la propia página. En dicha Wiki nos muestran los pasos necesarios para comenzar en ROS en la sección Getting Started (Ros Wiki 2018)

### 2.1.2.1 Instalación y Puesta en marcha de ROS

Dentro del desarrollo de aplicaciones o recursos de software solventados o mantenidos por una comunidad es muy importante definir la versión con la cual se desea trabajar ya que estos recursos de software (Package) son actualizados o se agregan nuevas funcionalidades constantemente, si el trabajo investigativo lleva una extensión de tiempo considerable y se desea aprovechar todas las funcionalidades de cierta versión, se debe elegir una distribución LTS en nuestro caso desde el inicio del desarrollo de este trabajo se instaló la distribución Kinetic, y se han aprovechado muchos de los recursos bajo esta distribución. Ver Anexo 1.2 Instalación de ROS.



Figura 2.2: Logo de la distribución de ROS, Kinetic Kame.

Al instalar todos los paquetes de ROS Kinetic con el comando

```
$ sudo apt-get install ros-Kinetic-desktop-full
```

*Comando BASH*

y entre otras herramientas como visualizadores de datos como, RQT, Rviz y el simulador Gazebo obtenemos los recursos de software necesarios para el desarrollo del Laboratorio Virtual de Robótica.

Es necesario conocer los comandos Shell para el desarrollo con ROS, los comandos más comunes son.

Tabla 2.2: Comandos ROS

Comando	Descripción
<b>roscore</b>	Es necesario ejecutar este comando ya que pone en marcha para que todos los demás funcionen. Es el encargado de gestionar toda la comunicación entre los nodos.

<b>roscd:</b>	Permite cambiar de paquete, directorio o stack. Sin necesidad que sean colindantes de forma jerárquica.
<b>rostopic</b>	[list] Muestra la lista de topics en ejecución
	[echo] Muestra información sobre el topic
	[type] Muestra el tipo del topic
	[pub] Publica un mensaje en un topic dado
<b>rosnode</b>	[list] Muestra la lista de nodos en ejecución
	[info] Muestra información sobre el nodo
	[ping] Comprueba la conexión con el nodo
	[kill] Mata el nodo indicado
<b>rosrun</b>	Ejecuta un nodo. \$ rosrun [PACKAGE_NAME] [NODO_NAME]
<b>rosmsg:</b>	Muestra información sobre los mensajes ROS
<b>roslaunch</b>	Permite lanzar varios nodos y parámetros simultáneamente \$ ros launch [PACKAGE_NAME] [/launch_FILE_NAME]

Si ejecutamos el comando

```
$ roscore
```

*Comando BASH*

Podemos comprobar el estado de la instalación de ROS y por ende proseguir con el desarrollo de software.

```
roscore http://yesser-dell-system-inspiron-n411z:11311/
yesser@yesser-dell-system-inspiron-n411z:~$ roscore
... logging to /home/yesser/.ros/log/9de7fc22-1498-11e9-a202-b5ee938d8173/roslau
nch-yesser-dell-system-inspiron-n411z-14673.log
Checking log directory for disk usage. This may take awhile.
Press Ctrl-C to interrupt
WARNING: disk usage in log directory [/home/yesser/.ros/log] is over 1GB.
It's recommended that you use the 'rosclean' command.

started roslaunch server http://yesser-dell-system-inspiron-n411z:34304/
ros_comm version 1.12.14

SUMMARY
=====
PARAMETERS
  * /rosdistro: kinetic
  * /rosversion: 1.12.14
NODES

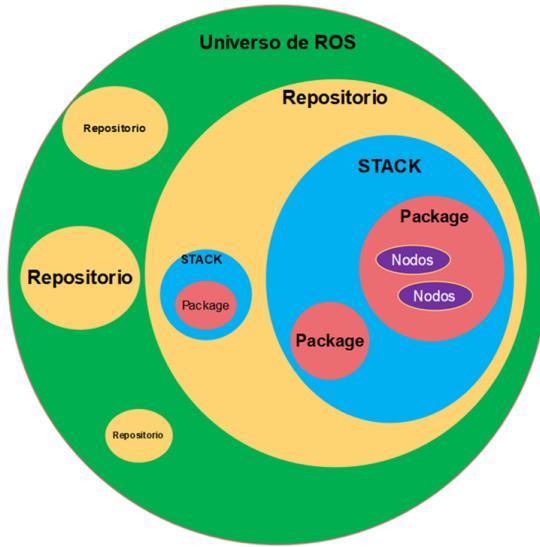
auto-starting new master
process[master]: started with pid [14683]
ROS_MASTER_URI=http://yesser-dell-system-inspiron-n411z:11311/
setting /run_id to 9de7fc22-1498-11e9-a202-b5ee938d8173
process[rosout-1]: started with pid [14696]
started core service [/rosout]
```

Figura 2.3: roscore servidor maestro

En la figura 2.5 se aprecia que está en excelente estado la instalación con el servidor maestro puesto en marcha.

### 2.1.2.2 Estructura de ROS

Como se especificó en la sección 1.2.1 Conceptos Básicos de ROS, los nodos en ROS se comunican entre sí por topics intercambiando mensajes siendo estos mensajes administrados y enrutados a su nodos correspondiente por el ROSMaster, podemos ver a estos nodos como ejecutables dentro de paquetes de software ya sea escritos en C++ o python para entender la estructura de ROS podemos ver la Figura 2.6 con su respectiva Tabla 2.2 que describe la clasificación de los elementos.



*Figura 2.4: Organización del software en ROS*

*Tabla 2.3: Estructura de ROS*

Clasificación	Descripción
<b>Repositorio</b>	Es en general un proyecto que puede tener diversos paquetes de software que interactúan intercambiando información bajo los nodos de ROS. El laboratorio Virtual de Robótica es considerado un Repositorio, en el van diferentes recursos de software como Widgets de Qt-Creator, QML con Qt Creator, librerías Boost, Librerías RVIZ y librerías ROS.
<b>Stack</b>	Las pilas o stacks contienen ciertos paquetes relacionados entre sí
<b>Packages</b>	Los paquetes contienen dentro la definición de los mensajes que utilizan los nodos asociados a estos, por ejemplo un paquete de un stack puede enviar información procesada de la cinemática de un robot vía mensajes a un nodo de otro paquete en otro Stack que no cuenta con este procesamiento y por ende los recursos de software.

Para entender mejor la estructura de un paquete y su relación con un Stack podemos ver la estructura del mismo en la Figura 2.7, relacionando directamente a el tipo de recurso que posee entre los diferentes paquetes.

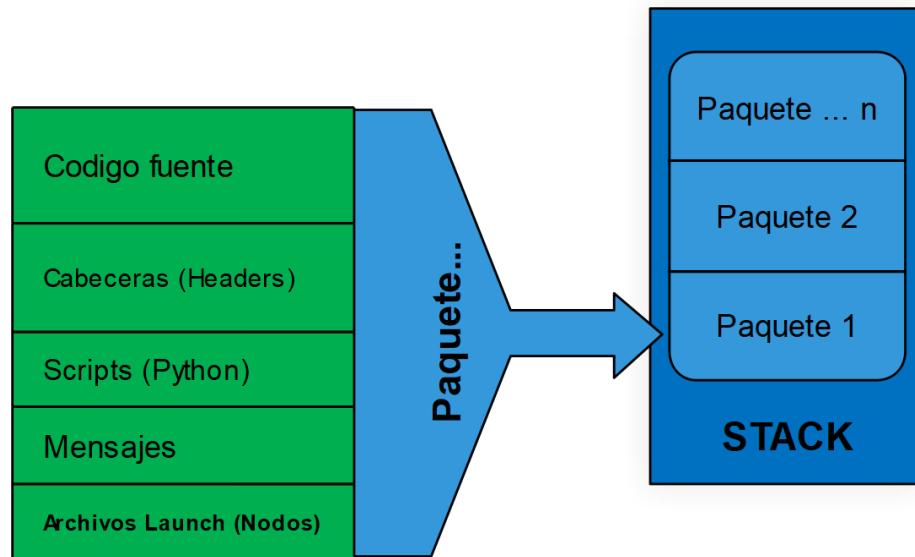


Figura 2.5: Organización de un paquete de software en ROS

Dentro de los paquetes encontramos los siguientes elementos que son fundamentales entender para el desarrollo de cualquier aplicación con ROS.

Tabla 2.4: Contenido de un Package

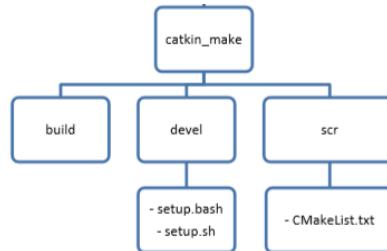
Elementos	Descripción
<b>Package.xml</b>	Este archivo de lenguaje descriptivo contiene todos los paquetes de los que depende el mismo paquete en cuestión. Se definen aquellos que van a ser construidos y los que van a ejecutarse bajo las etiquetas <code>&lt;build_depend/&gt;</code> y <code>&lt;run_depend/&gt;</code>
<b>CMakeFile</b>	Este archivo se encarga de compilar el paquete. Deben incluirse todas las dependencias y códigos que se hayan desarrollado si existiesen. Estos códigos tendrán librerías específicas que hacen referencia a paquetes de ROS por ello es necesario definir cada uno de estos paquetes para que el compilador lo tenga en cuenta
<b>Carpetas</b>	Normalmente se designa las siguientes carpetas: <code>src</code> , <code>launch</code> , <code>bag</code> . <code>src</code> se guarda el código que se desea compilar y ejecutar como nodo. <code>launch</code> se guardan los lanzadores de nodos.

Para crear un paquete utilizamos las instrucciones de línea de comando del compilador Catkin, para esto debemos crear un Espacio de trabajo para el compilador (Ver anexo A.4 Catkin) donde estarán almacenados todos los paquetes que vayamos creando, es necesario conocer 3 comandos importantes al compilar con Catkin.

*Tabla 2 5: Comandos Catkin.*

Comandos	Descripción
<b>catkin_init_workspace</b>	Inicializa el espacio de trabajo creado
<b>catkin_create_pkg</b>	Crea un paquete con la dependencia de una librería u otro paquete de ROS. [PACKAGE_NAME] [DEPENDENCY_PACKAGE1]
<b>catkin_make</b>	Compila todos los paquetes dentro del Espacio de Trabajo.

En la Figura 2.8 se muestra la estructura de carpetas que conforman nuestro espacio de trabajo con Catkin.



*Figura 2.6: Espacio de Trabajo Con Catkin.*

### 2.1.2.3 Compilación de Paquetes de ROS.

Todo paquete debe contener dos archivos los cuales son de importancia para el compilador CMakefile.txt y package.xml, En estos se definen los recursos de software de un paquete para que este sea compilado correctamente. Los archivos CMakefile y package.xml poseen varias funciones a tener en cuenta, pero en nuestro caso, tendremos en cuenta los siguientes parámetros.

## find\_package

CMakeLists.txt

Este atributo del archivo CMakeLists permite agregar los paquetes necesarios para la compilación.

Indicamos el mismo paquete en las dependencias de catkin.

## catkin\_package

CMakeLists.txt

```
1  cmake_minimum_required(VERSION 2.8.3)
2  project(my_first_node_lab_UNI)
3
4  find_package(catkin REQUIRED COMPONENTS
5    roscpp
6  )
7
8  catkin_package(
9    # INCLUDE_DIRS include
10   # LIBRARIES myworkcell_core
11   CATKIN_DEPENDS
12    roscpp
13   # DEPENDS system_lib
14 )
```

The diagram shows the CMakeLists.txt file with several annotations:

- Line 1: 'Version de Catkin' (Version of Catkin) - points to 'cmake\_minimum\_required(VERSION 2.8.3)'.
- Line 2: 'Nombre del paquete' (Package name) - points to 'project(my\_first\_node\_lab\_UNI)'.
- Line 4: 'Dependencia del paquete o project' (Dependency of package or project) - points to 'find\_package(catkin REQUIRED COMPONENTS roscpp)'.
- Line 12: 'Dependencia del paquete o project' (Dependency of package or project) - points to 'CATKIN\_DEPENDS roscpp'.

Figura 2.7: Archivo CMakeLists con parámetros para compilación

Es necesario la correcta configuración de este archivo debido a que la compilación de un paquete a ser usado bajo ROS depende de lo indicado en el archivo CMakeLists, En la Figura 2.9 se muestra parte de los atributos necesarios a ser configurados.

El archivo package.xml es un complemento de CMakeLists.txt donde también se agregan las dependencias solo que en formato con etiquetas en un archivo .XML dentro de estos atributos tenemos los más destacados a analizar a continuación.

Todas estas etiquetas en el archivo de marcado son atributos importantes para hacerle referencia al compilador de que recursos se ocuparan en el paquete y

demás como se utilizaran, por ejemplo el <build\_depend> se utiliza para hacer el llamado de las librerías a utilizar en el paquete a compilar.

```
<build_depend>roscpp</build_depend>
```

package.xml

En cambio el <run\_depend> del mismo paquete se utiliza para incluir los vínculos de los archivos objetos a ejecutar dentro del paquete con los comandos de *rosrun* (Ver Tabla 2.2: Comandos ROS)

```
<run_depend>roscpp</run_depend>
```

package.xml

```
1  <?xml version="1.0"?>
2  <package>
3      <name>my_first_node_lab_UNI</name>
4      <version>0.0.0</version>
5      <description>The my_first_node_lab_UNI package</description>
6      <maintainer email="myalfredo03@ieee.org">Yeser A. Morales</maintainer>
7      <license>GPLv2</license>
8
9      <buildtool_depend>catkin</buildtool_depend>
10     <build_depend>roscpp</build_depend>
11     <run_depend>roscpp</run_depend>
12
13     <!-- The export tag contains other, unspecified, tags -->
14     <export>
15         <!-- Other tools can request additional information be placed here -->
16
17     </export>
18 </package>
```

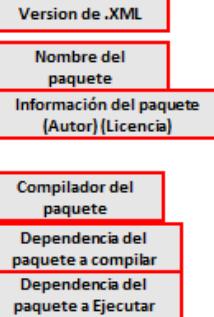


Figura 2.8: Archivo package.xml con etiquetas de referencia de paquetes.

Al crear un paquete siguiendo las indicaciones plasmadas en el anexo 1.4 Catkin, se garantiza que podemos crear lógica de programación dentro de un archivo en C++, crear un nodo, hacer traspasos de mensajes vía tópicos usando los recursos de ROS o en todo caso hacer uso de Widgets para la creación de Interfaces de usuario, donde estas interfaces a crearse para el laboratorio después de todo se puede definir como un paquete con recursos de ROS que puede mostrar información al usuario.

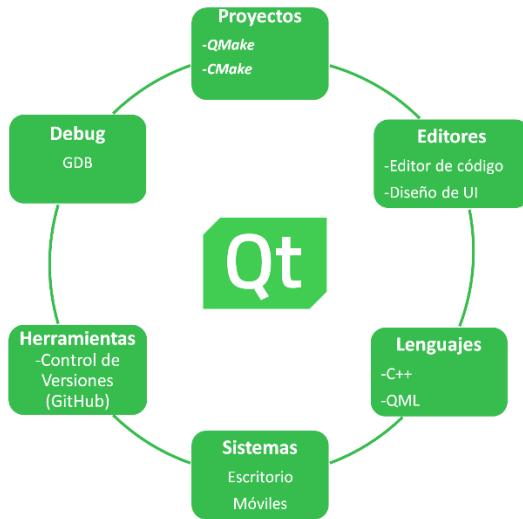
### **2.1.3 IDE QT-Creator.**

En la Sección 1.3.1 se mencionan las diferentes tecnologías más conocidas para el diseño de una interfaz de usuario por lo tanto se da a conocer que QT-Creator posee varias ventajas que benefician este trabajo monográfico destacando la característica multiplataforma de este IDE, además, anteriormente en la sección 2.2.1 se dan a conocer los detalles del porque se usó el sistema operativo Ubuntu y la posibilidad de migrar este trabajo monográfico a un sistema operativo de uso común como lo es Windows, al usar QT - Creator junto con la futura versión de ROS (Microsoft ROS) para Windows es posible gracias a su característica multiplataforma.



*Figura 2.9: Logo de QT-Creator*

Qt Utiliza el Lenguaje de programación C++ como principal herramienta de desarrollo, pero adicionalmente puede ser utilizado en otros lenguajes de programación a través de “bindings” o Plugins Conocidos normalmente, los plugins mas conocidos son PyQt para el desarrollo de interfaz en Python, QtRuby, PHP-QT y entre otras.



*Figura 2.10: Recursos de QT para el Desarrollador.*

Debido las características mostradas en la Figura 2.12 del IDE QT Como el uso, de proyectos compilados con CMake (Ver sección 2.2.2.3 Compilación de Paquetes de ROS.) Uso de lenguajes como C++ para trabajar con ROS y otras librerías como KDL escritas en este lenguaje y QML para el desarrollo de interfaces y entre otras bondades plasmadas en la Figura 2.12, por lo cual el IDE Qt Es el que adopta todos los recursos de software necesarios para un desarrollo ágil y centralizado.

QT provee de recursos a otros lenguajes de programación y posee la capacidad de adoptar muy fácilmente varios recursos de que poseen otros Lenguajes dentro del propio IDE, Por ejemplo, diseñar una interfaz de Usuario (GUI) con capacidad de cargar una pagina WEB o vincular recursos de base datos, tales recursos son utilizados dentro de este laboratorio Virtual.

Dentro del desarrollo de este trabajo monográfico se aprovecharon 3 ejes principales de Qt- Creator los cuales son el uso del plugin de ROS para el IDE, El uso de Widgets para aplicaciones de interfaz de Usuario nativas en C++ y el uso de Widgets QML para para aplicaciones de interfaz de usuario donde el lenguaje QML, presta ciertas bondades parecidas a usar CCS al diseñar paginas Web le aporta dinamismo y mayores prestaciones visuales al desarrollar una aplicación con QML.

### 2.1.3.1 Plugin de ROS para Qt-Creator

La Versión de QT usada en este trabajo monográfico es la versión 5.7 compatible con el Plugin de ROS desarrollado por el Consorcio de ROS – Industrial, Este plugin Permite la agilización de creación de paquete de ROS, Mensajes, Servicios, Acciones e incorporar la estructura básica de programación en C++ de un nodo.

Al instalar el IDE (Ver anexo 1.4) se puede proceder a la instalación y configuración del plugin para el IDE QT (Ver anexo 1.5) de la misma forma que se agiliza la creación de un paquete podemos compilar y hacer debugeo del paquete de ROS, dentro del IDE, ver Figura 2.13.

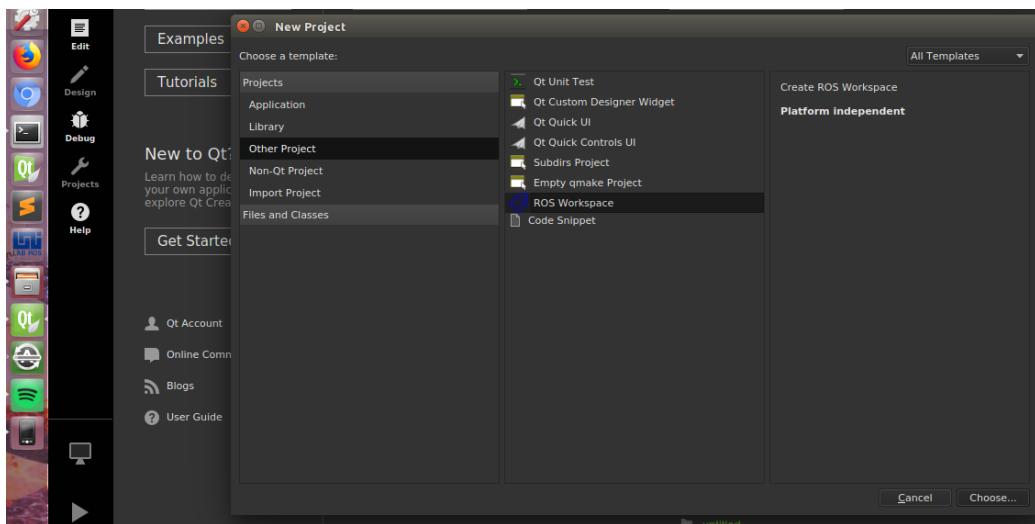


Figura 2.11: Plugin CATKIN con QT-Creator Creación del Workspace de Trabajo.

### 2.1.3.2 Widgets QT

Widgets y formas creadas con Qt Designer arrojan un formato de archivo .UI el cual se integran a la perfección con código programado bajo ROS, mediante el uso de las señales de Qt todo esto bajo el lenguaje C++.

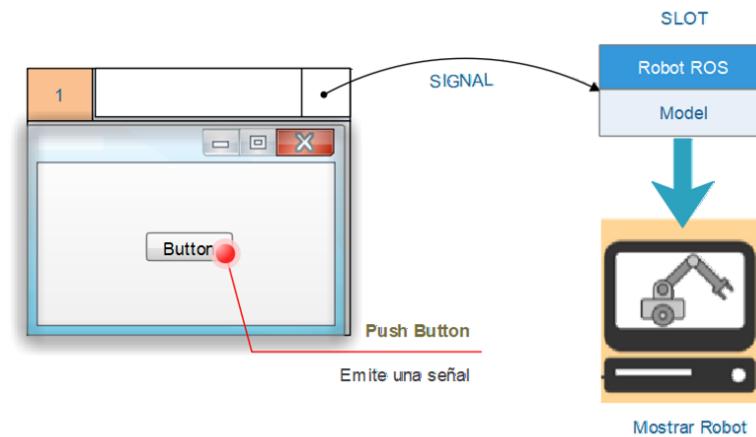


Figura 2.12: Widgets UI con conexión a Proceso ROS

En la Figura 2.14 se muestra un botón el cual es un widget dentro de Qt, que al ser accionado (presionado) emite una señal que es referenciada a una función dentro del código en C++ el cual ejecuta un proceso, en este ejemplo de la figura ejecuta el proceso de mostrar el robot a simular. Cabe destacar que Qt posee los widgets comunes que cobran importancia para el manejo de datos para toda interfaz de usuario, como Slider, Push Buttons, CheckBox, Tablas y otros.

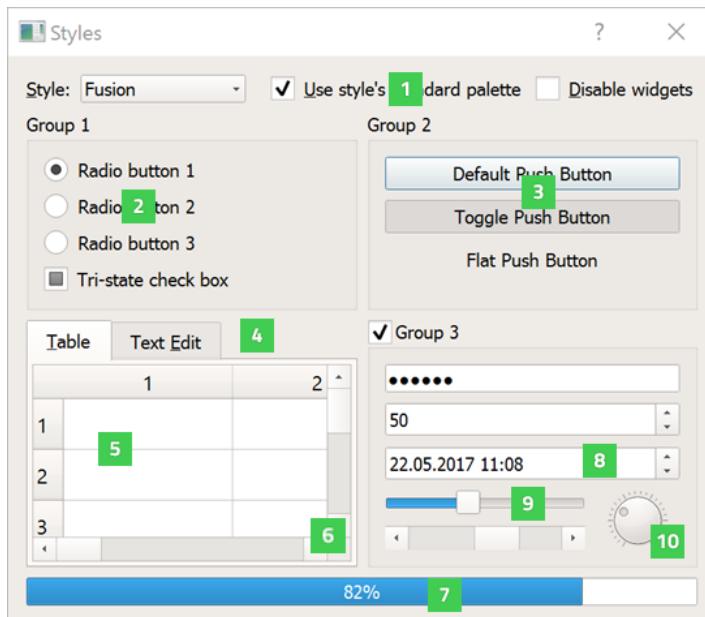


Figura 2.13: Widgets Qt. En Qt Widget Gallery por QT Wiki 2019.

La Figura 2.15 se muestra una recompilación de los widgets más comunes en una interfaz de usuario entre ellos destacan los siguientes.

- [1] QCheckBox, provee un CheckBox con una etiqueta de texto.
- [2] QRadioButton Provee un Radio button Con una etiqueta de Texto.
- [3] QPushButton Provee un botón con etiqueta.
- [4] QTabWidget Provee un Espacio con widgets apilados.
- [5] QTableWidget Provee una table de datos.
- [6] QScrollBar Provee una barra vertical y horizontal deslizante.
- [7] QProgressBar Provee una barra horizontal progresiva.
- [8] QDateTimeEdit Provee un Widget Para edición de fechas y horas.
- [9] QSlider Provee un Slider horizontal.
- [10] QDial, Provee un control Redondo tipo potenciómetro.

### 2.1.3.3 Widgets QML

La programación en QML describen un árbol de elementos, estos elementos son los Widgets en QML, los cuales poseen animaciones más fluidas y agradables para la experiencia del usuario.

La figura 2.16 se muestra un ejemplo de código escrito en con el resultado que se mostraría por pantalla.



The screenshot shows the Qt Quick Designer interface. On the left, there is a code editor with the following QML code:

```
import QtQuick 2.0
Rectangle {
    width: 400; height: 300
    Text {
        text: qsTr("Hello")
        font.pointSize: 25;
        anchors.horizontalCenter: parent.horizontalCenter
        anchors.verticalCenter: parent.verticalCenter
    }
}
```

On the right, the preview window displays the word "Hello" centered in a white rectangle with a black border. The title bar of the window says "qmldesigner".

Figura 2.14 Código escrito en QML

### 2.1.4 Librería Orosco

Es una librería de software libre de propósito general para el control de dispositivos robóticos. Soporta cuatro bibliotecas desarrolladas en C++:

- ✓ Real-Time Toolkit (RTT)
- ✓ Kinematics and Dynamics Library (KDL)
- ✓ Bayesian Filtering Library (BFL)

- ✓ Orocó Component Library (OCL)

La librería Kinematics and Dynamics Library (KDL) es la que se usará en este trabajo. Con ella podemos dotar el software de hacer cálculos para el problema cinemático directo e inverso. Debido a las muchas soluciones que posee la cinemática inversa se utilizan algoritmos más sofisticados como es el método de obtención de raíces Newton-Raphson para obtener una aproximación al punto deseado para el robot. (Ver figura 2.17)

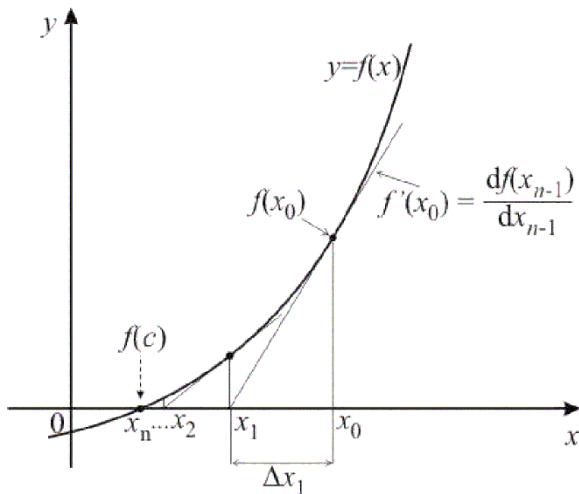


Figura 2.15: Método de Newton-Raphson

```
int KDL::ChainIkSolverPos_NR_JL::CartToJnt ( const JntArray & q_init,
                                              const Frame & p_in,
                                              JntArray & q_out
                                              ) [virtual]
```

Calculates the joint values that correspond to the input pose given an initial guess.

**Parameters:**

**q\_init** Initial guess for the joint values.

**p\_in** The input pose of the chain tip.

**q\_out** The resulting output joint values

Figura 2.16: Clase de la librería KDL para resolución de Problema Cinemático . En *ChainIkSolverPos\_NR\_JL* por orocos\_kdl 2019.

Los métodos software utilizados son CartToJnt() para el cálculo de la cinemática inversa y JntToCart() para el cálculo de la cinemática directa. En la Figura 2.18 se muestra el método CartToJnt() de la API de KDL. Este método espera los

siguientes datos de entrada como la posición articular actual del manipulador ( $q_{init}$ ) y posición cartesiana deseada ( $p_{in}$ ) y como salida de datos nos da la posición articular del manipulador ( $q_{out}$ ).

### 2.1.5 Open Rave IkFast

IKFast es un módulo de OpenRAVE, el cual especifica que es un compilador para cinemática de robots (OpenRAVE 2018). El cual puede resolver analíticamente las ecuaciones de la cinemática, de diferentes tipos de robots este genera un archivo C++ el cual especifica la cinemática de un robot en particular. De esta forma agiliza el desarrollo de una aplicación robótica, concentrándonos nada más en la lógica de uso de los datos de la cinemática.

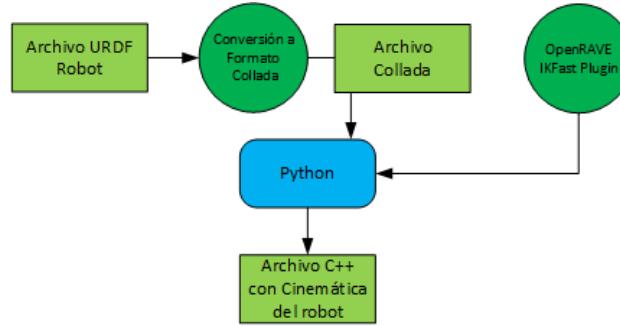
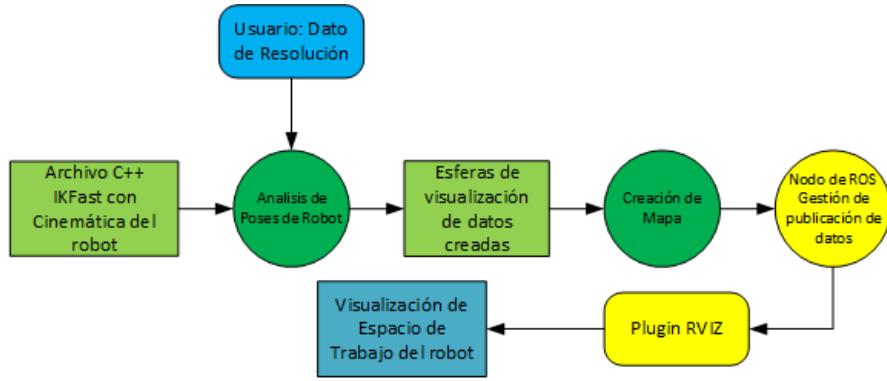


Figura 2.17: Uso del módulo IKFast para la Cinemática de robots

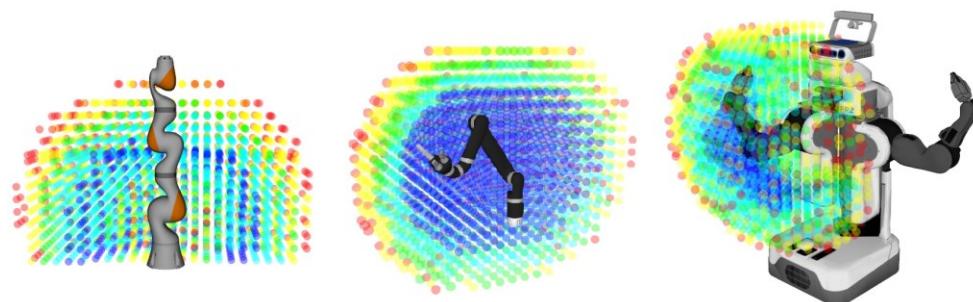
### 2.1.6 Reuleaux

Reuleaux es un plugin para RViz para visualizar el espacio de Trabajo de diferentes tipos de Robots desarrollada por usuarios de la comunidad de ROS, Makhale, A., et al (2018) usan IKFast (Ver sección 2.2.5) para el mapeo de accesibilidad de un modelo de robot dado, creando poses en el entorno y calculando soluciones de IK válidas para las poses proveniente del archivo IKFast.



*Figura 2.18: Proceso de ROS para gestionar la Visualización del espacio de trabajo*

Las poses a las que puede acceder el robot están asociadas a esferas discretizadas. La accesibilidad de cada esfera en el entorno está parametrizada por un índice de Alcance de 1 a 100 cambiando de colores la esfera de acuerdo a su accesibilidad y la resolución que el usuario desea que se analice en el espacio de trabajo. El formato de archivo hdf5 guarda los detalles sobre todas las poses accesibles y esferas discretizadas.



*Figura 2.19: Espacios de Trabajo con Reuleaux. En Reuleaux: Robot base placement by reachability analysis por Makhale, A., et al.*

### 2.1.7 QCustomPlot

Dentro de las interfaces de usuario que se ocuparan para mostrar los fundamentos de robótica es necesario contar con un graficador de datos para diferentes procesos de movimientos de los robots a analizar, para esto se usó una biblioteca de expansión para QT, llamada QCustomplot. Esta biblioteca de gráficos se enfoca en crear gráficos, así como en ofrecer un alto rendimiento para aplicaciones de visualización en tiempo real. Para el uso de esta librería es

necesario agregar los archivos `qcustomplot.cpp` y `qcustomplot.h` al proyecto en QT para el desarrollo y configuración de las gráficas para los datos provenientes desde los nodos de ROS.

## 2.2 Diseño del LVR

El laboratorio virtual de robótica desarrollado pretende, entre otras cosas, recrear los recursos básicos que se encuentran en un laboratorio de robótica industrial real y brindar los recursos necesarios para la utilización de estos en la realización de experimentos. En la Figura 2.20 se muestran los elementos que generalmente se encuentran en un laboratorio real.

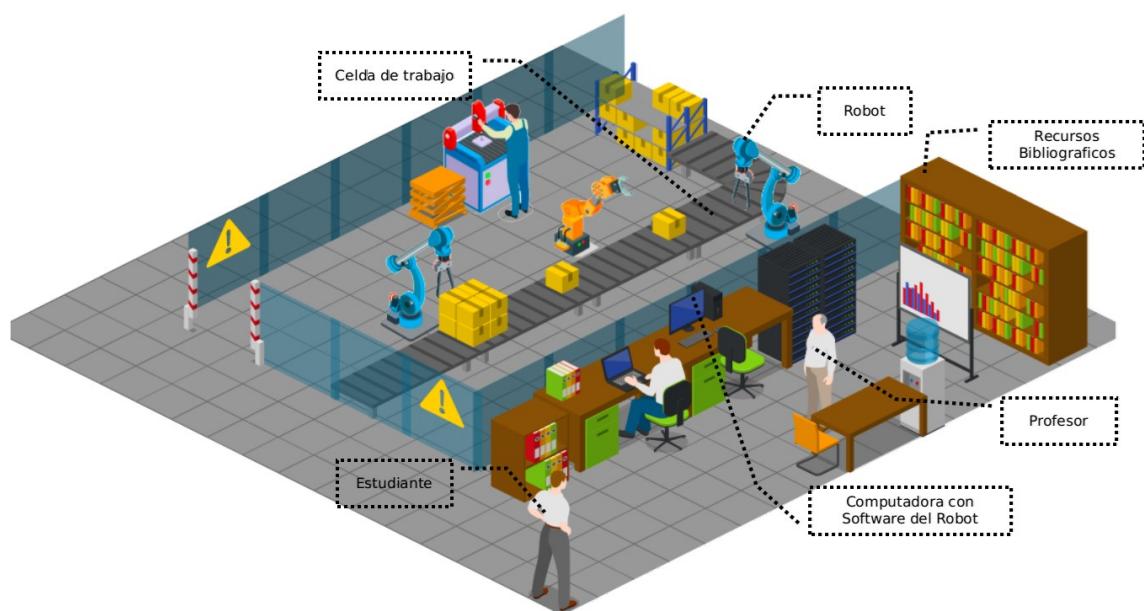


Figura 2.20: Modelo de laboratorio de robótica física.

Básicamente se cuenta con un robot, una computadora con el software correspondiente para la programación de este, una celda de trabajo, y un espacio donde se almacena la documentación correspondiente al robot, por ejemplo, manual de usuario y/o manual de instalación.

En la revisión de literatura y reconocimiento de los laboratorios en algunas instituciones de educación superior, encontramos que la principal actividad que se

realiza en este tipo de laboratorios es la programación del robot, usando un lenguaje específico, para que ejecute una tarea determinada.

El laboratorio virtual desarrollado, ver Figura 2.21, cuenta con los recursos de un laboratorio básico de robótica e incorpora otros recursos que permiten realizar otras actividades como comprobación de Cinemática del robot yendo más allá de la simple programación del modelo del robot bajo consideración.

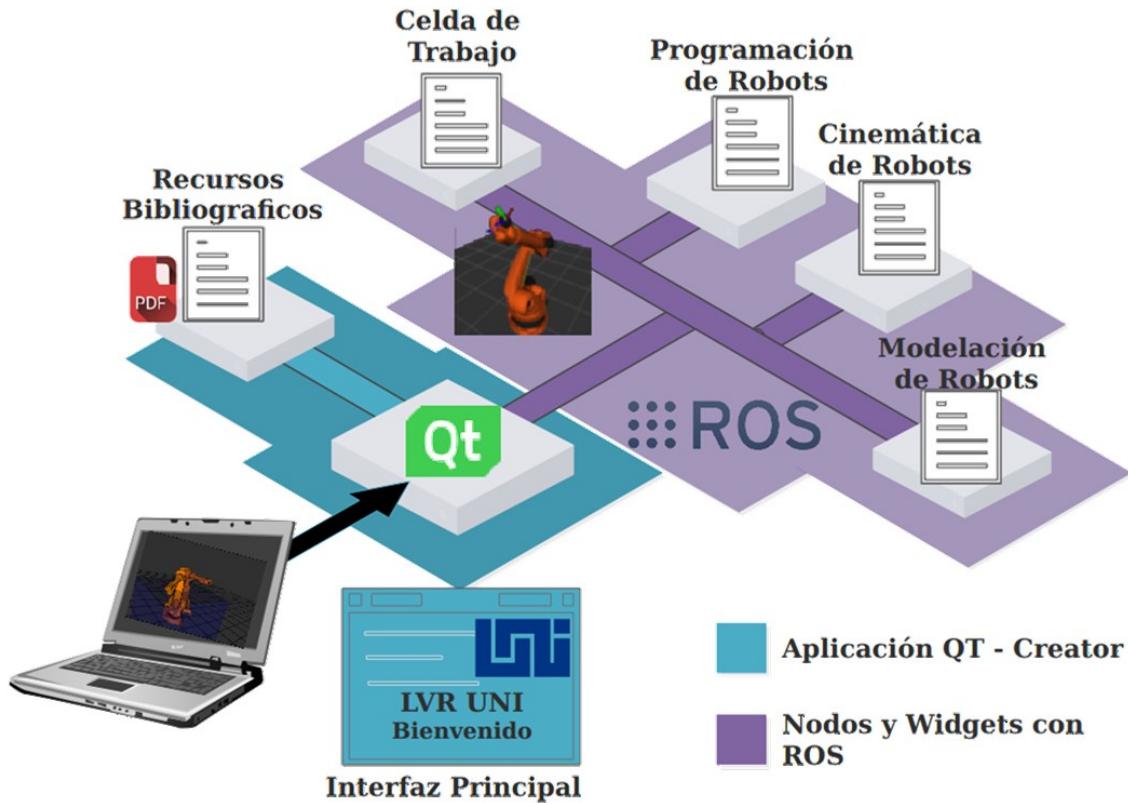


Figura 2.21: Modelo del laboratorio Virtual de Robótica Industrial.

## 2.2.1 Modelos de los robots

El definir Simulación de robots puede significar varias cosas para diferentes roboticistas. Para ciertos roboticistas, la simulación de sistemas robóticos abarca la visualización de como un robot se mueve a través de su espacio. Estos simuladores están ampliamente basados en diseños CAD y herramientas de visualización gráfica.

Como se definió anteriormente es necesario contar con los modelos CAD de los robots para integrarlos a una simulación, de esta misma forma los fabricantes de Robots poseen sus propios simuladores (ver figura 2.8) de Robots, por lo tanto utilizan archivos CAD para visualizar el modelo del robot, estos mismos modelos están disponibles en las páginas WEB de los fabricantes más reconocidos como ABB, Fanuc, KUKA estos archivos están disponibles con mayor o menor Resolución como son STL, 3DS, VRML1, DXF, IGES, GoogleSketchUp, SLDASM, etc.

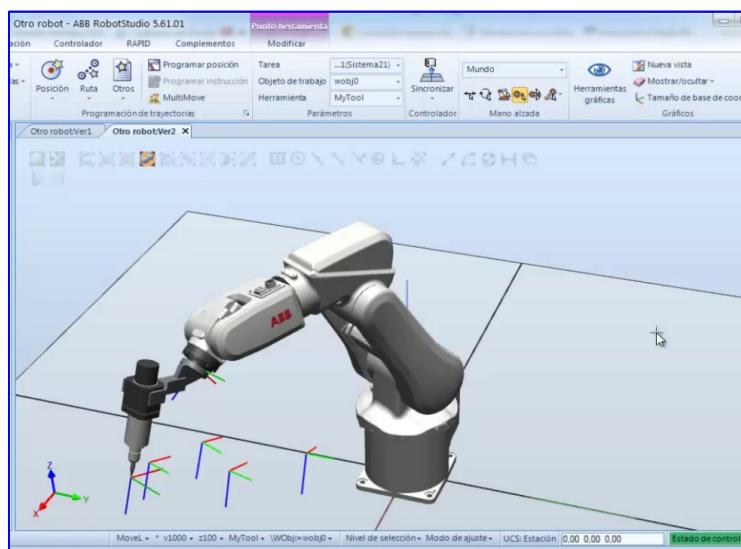


Figura 2 22: Captura de pantalla de Software ABB RobotStudio

### 2.2.1.1 Modelos de los Fabricantes de robots

Dentro del consorcio de industrias que posee ROS, llamado ROS-Industrial, se cuenta con la colaboración de empresas como ABB, FANUC, Yaskawa, KUKA, entre otras que colaboran proveyendo repositorios de libre acceso a la comunidad de roboticistas, dentro de esta colaboración se tiene acceso a los modelos de robots modelados por estas empresas con lenguaje descriptivo URDF que describen fielmente el modelo del robot tal como si se usara el modelo en el simulador del fabricante del robot.

### 2.2.1.2 Modelos Creado por el usuario

La creación de un nuevo modelo de robot es posible conociendo el lenguaje descriptivo URDF el cual consta de una serie de etiquetas XML que permiten especificar una serie de parámetros de cada eslabón y de cada articulación del robot, en los eslabones posible indicarle una etiqueta con referencia a un archivo CAD y proveer la información de su posición y orientación en el espacio.

#### 2.2.1.2.1 URDF

Es necesario conocer que el modo descripción de etiquetas en un archivo URDF es prácticamente genérico para todo tipo de robots, desde un Vehiculó aéreo no tripulado hasta un brazo manipulador, existen ciertas limitaciones que hacen imposible la descripción de ciertos robots. La principal limitación es que los robots deben ser robots series (estructura de árbol), descartando las cadenas cinemáticas cerradas.

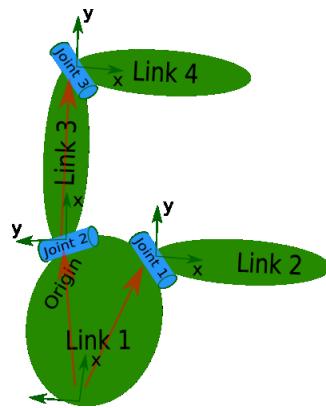


Figura 2.23: Representación de Links y Joints en un URDF.

El robot se interpreta como un conjunto de eslabones (links) unidos mediante un conjunto de articulaciones (joints) tal y como se muestra en la figura 2.18 de esta forma el archivo URDF poseerá etiquetas de lenguaje de marcado de la siguiente forma y clasificación a respetarse, a como se muestra en la figura 2.19, la etiqueta **robot** es la etiqueta general de un archivo URDF

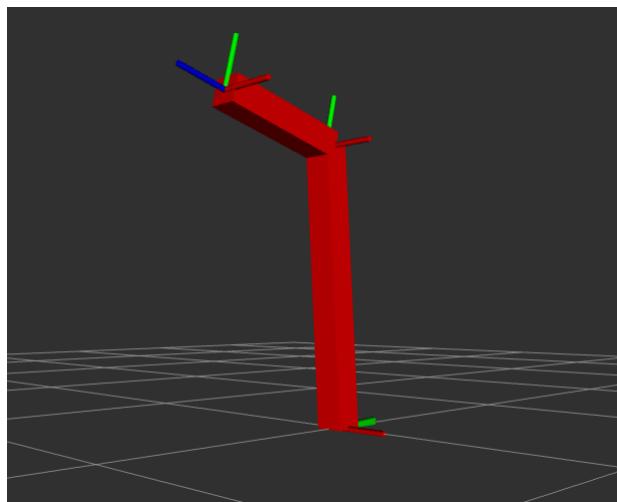
```

<robot name="manipulador">
  <link name="link_1"> ... </link>
  <link name="link_n"> ... </link>
  <joint name="joint_1" type="revolute"> ... </joint>
  <joint name="joint_n" type="prismatic"> ... </joint>
</robot>

```

*Figura 2.24: Estructura del lenguaje de marcado URDF*

Un Modelo por el usuario usando simples etiquetas URDF puede ser elaborado como el robot con dos eslabones que se muestra en la figura 2.25



*Figura 2.25 Robot 2 grados de libertad usando URDF*

### 2.2.1.3 Soporte de ROS – Industrial

ROS – Industrial (ROS – I) es un consorcio de empresas que utilizan los recursos de ROS pero a nivel industrial, estas implementaciones de Software para aplicaciones Industriales a dado cabida de nuevos paquetes de software de ROS como MoveIt para la planeación de trayectorias para los robots industriales, además de la colaboración de los desarrolladores de las propias empresas como ABB, Fanuc, KUKA, Motoman, entre otras para proveer de paquetes que interactúen con ROS por ejemplo, la capacidad de ROS – I de Comunicarse vía un nodo de ROS con el controlador (CPU) de un Robot Industrial.

#### 2.2.1.3.1 Estructura de Un paquete ROS-I

Dentro del desarrollo de este trabajo se utilizaron los paquetes de ROS Industrial (Ver figura 2.21) estos poseen Archivos URDF de robots industriales, Archivos de Configuración de los Joints del robot, Archivos Launch para aplicaciones con Robots reales, Archivos CAD (meshes) y archivos de testeo de puesta en marcha de un robot.

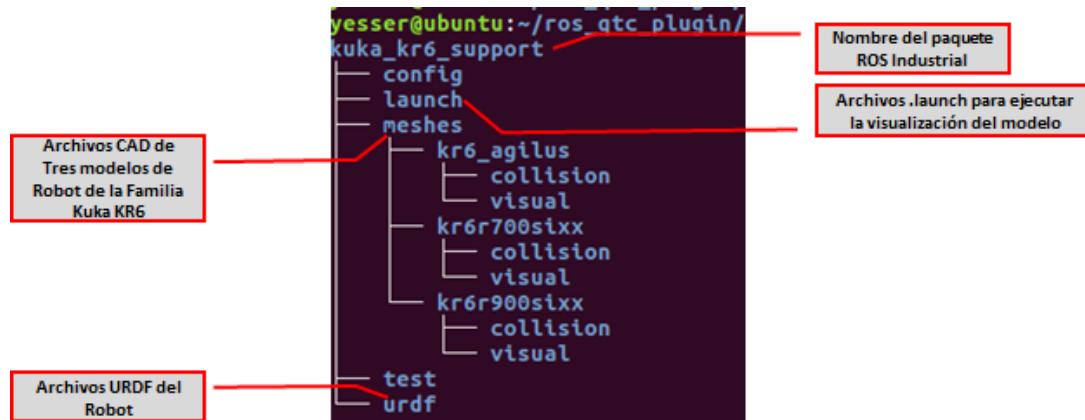


Figura 2.26: Paquete de Modelo de un Robot Kuka

Los archivos URDF pueden ser configurados por nosotros mismo como se menciona en la sección 2.3.2 pero para LVR se usarán los Archivos URDF que han parametrizados las empresas unidas al consorcio de ROS tales como ABB, FANUC, Motoman etc. Garantizando de esta manera un robot simulado que cumple a cabalidad la hoja de datos proveída por el fabricante, en estos cumplimientos están la máxima apertura de los Joints en radianes, la inercia de los eslabones del robot en Kg su masa y en  $\text{Kg} * \text{m}^2$ .

#### 2.2.1.3.1.1 Archivos CAD de los robots industriales

El uso de Archivos CAD dentro de este trabajo toma mucha importancia, tal que le pueda brindar al estudiante un acercamiento a un robot pero modelado en 3D. Dentro de los paquetes de ROS Industrial se obtiene el modelo del robot bajo las mismas dimensiones que el robot en físico, este detalle cobra importancia al ejecutar análisis de Cinemática y en análisis más avanzados dentro de la dinámica del modelo en 3D. Además, dentro de este paquete se encuentran dos tipos de CAD la categoría Visual para obtener la representación más fidedigna y la

categoría Colisión para análisis de trayectorias y dentro del Simulador avanzado de Gazebo Colisionar con objetos y ver su respuesta. (Ver figura 2.22)

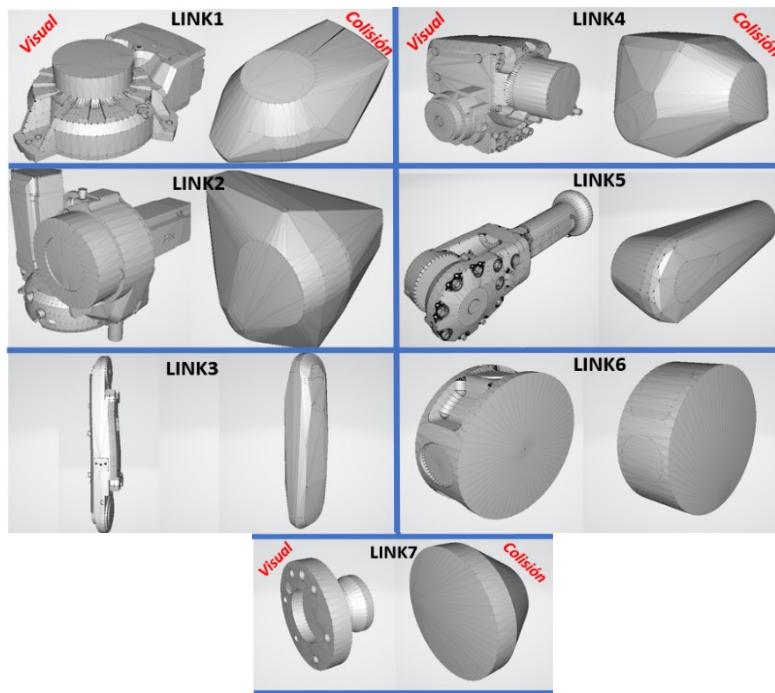


Figura 2.27: Modelos de CAD en 3D

#### 2.2.1.3.2 Validación de los modelos de Robots utilizados.

Para validar los paquetes de ROS Industrial creados para la comunidad de desarrolladores se usará el Software oficial de ABB Robot Studio, en este caso los robots a someter a pruebas son el modelo IRB2600 y el modelo IRB120 los cuales serán posicionados a 2 Posiciones aleatorias y comprobar en Los visualizadores de ROS y Robot Studio los mismos valores para el efecto final (TCP) y los Joints Propios de cada Robot. Los ángulos de los Joints y su diferencia son mostrados en la Tabla 2.6 y 2.7, Así como sus poses en las Figuras 2.23 – 2.26.

Tabla 2.6: Validación de Modelo ABB IRB2600

Posiciones de Robot en ROS Contra Robot en ABB Robot Studio					
Joints	ROS y Robot Studio	Coordenadas	Posición del TCP en ROS	Posición del TCP en Robot Studio	Error de Posición del TCP
			Angulo en Grados	Distancia en Metros	Error en Metros
<b>Pose 1 Robot IRB2600</b>					
1	-82.61	X	0.228112	0.22815	0.000038
2	35.43				
3	-0.14	Y	-1.2978	-1.29784	0.00004
4	83.09				
5	44.64	Z	0.609155	0.60912	0.000035
6	160.0				
<b>Pose 2 Robot IRB2600</b>					
1	84.35	X	-0.0200323	-0.02004	0.0000077
2	-66.01				
3	39.28	Y	0.229933	0.22983	0.000103
4	-71.50				
5	-31.88	Z	1.23508	1.23515	0.00007
6	160.0				

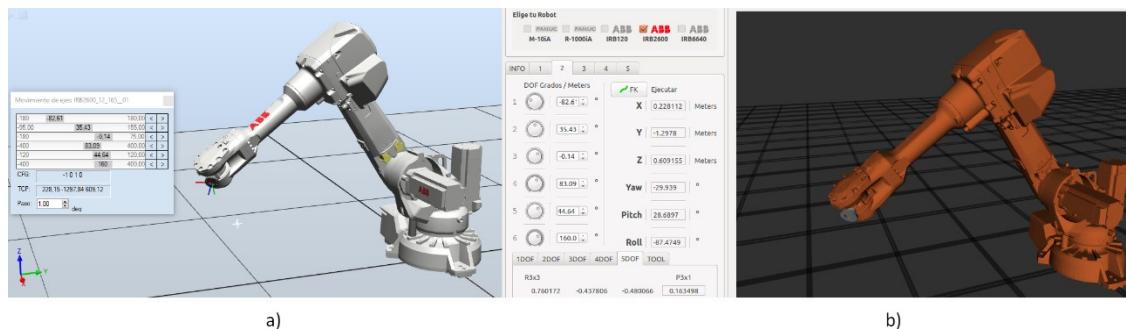
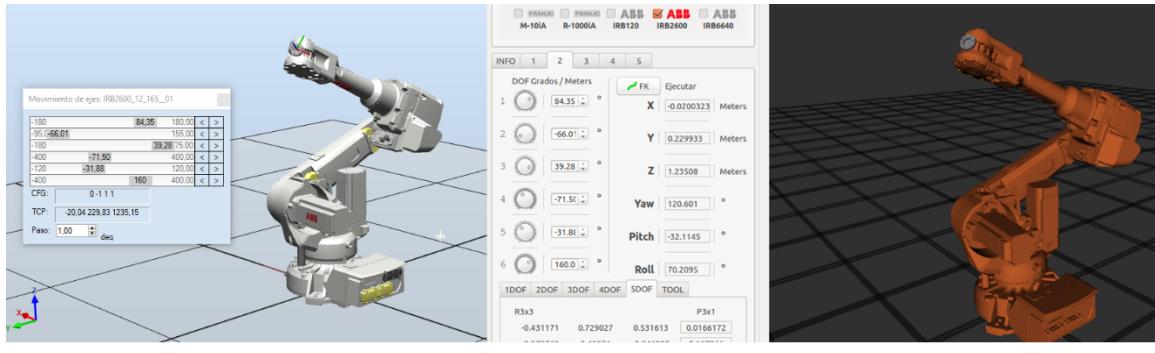


Figura 2.28: Pose 1 del Robot ABB IRB2600 a) Robot Studio b) Visualizador Plugin RVIZ



a)

b)

Figura 2.29 Pose 2 del Robot ABB IRB2600 a) Robot Studio b) Visualizador Plugin RVIZ

Tabla 2.7: Validación de Modelo ABB IRB120

Posiciones de Robot en ROS Contra Robot en ABB Robot Studio					
Joints	ROS y Robot Studio	Coordenadas	Posición del TCP en ROS	Posición del TCP en Robot Studio	Error de Posición del TCP
			Angulo en Grados	Distancia en Metros	Error en Metros
<b>Pose 1 Robot IRB120</b>					
1	104.00	X	0.0677014	0.0702	0.0024986
2	22.85				
3	46.04	Y	0.340683	0.34018	0.000503
4	16.23				
5	-56.23	Z	0.265651	0.26566	0.000009
6	0.00				
<b>Pose 2 Robot IRB120</b>					
1	78.91	X	0.113571	0.1137	0.000129
2	49.42				
3	-90.00	Y	0.382627	0.38268	0.00053
4	-137.00				
5	50.43	Z	0.775921	0.77582	0.000101
6	0.00				

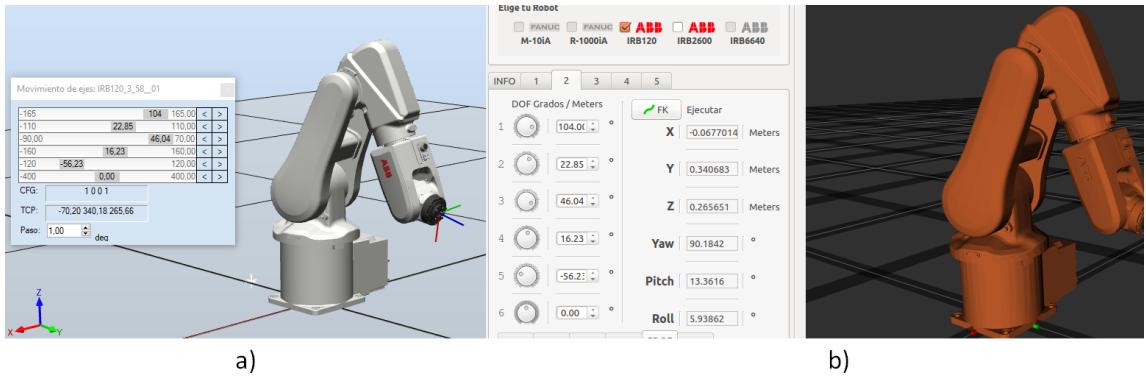


Figura 2.30: Pose 1 del Robot ABB IRB120 a) Robot Studio b) Visualizador Plugin RVIZ

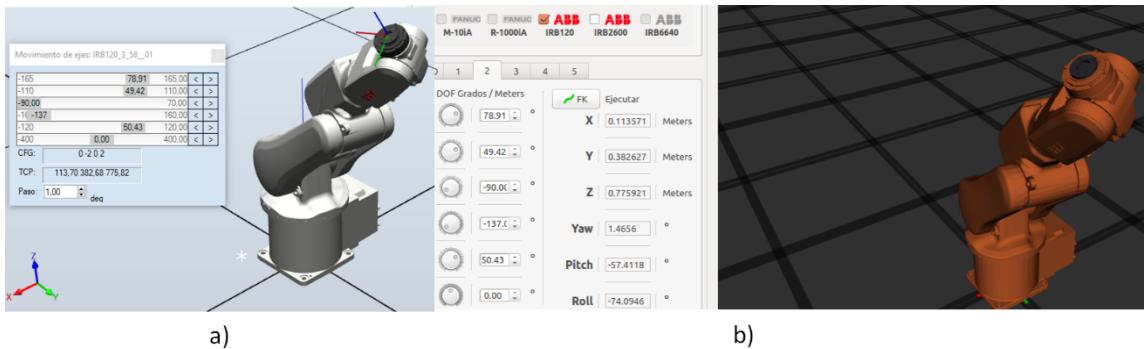


Figura 2.31: Pose 2 del Robot ABB IRB120 a) Robot Studio b) Visualizador Plugin RVIZ

La diferencia de posición del TCP listados en la tabla 2.5 y 2.6 son en el orden de decimas de milímetros, además se puede observar en las Figuras 2.23 – 2.26 las mismas posiciones en el ambiente 3D del Robot, confirmando así que los modelos a utilizar en este LVR corresponden a los modelos que ocupan los Fabricantes de Robots en sus softwares de programación correspondientes.

## 2.2.2 Diseño de la interfaz principal.

La interfaz Principal está diseñada bajo el lenguaje QML de QT para crear aplicaciones dinámicas, Para este diseño de interfaz se tomaron en cuenta los siguientes requerimientos necesarios que debe soportar la interfaz a como se especifica en la Figura 2.32

- ✓ Centralización de todos los recursos del LVR en una interfaz principal.
- ✓ Visualización de Recursos bibliográficos y visuales (Videos).
- ✓ Manejo de Procesos (Thread) para ejecutar los nodos de ROS sin necesidad de usar línea de comandos por terminal Linux.

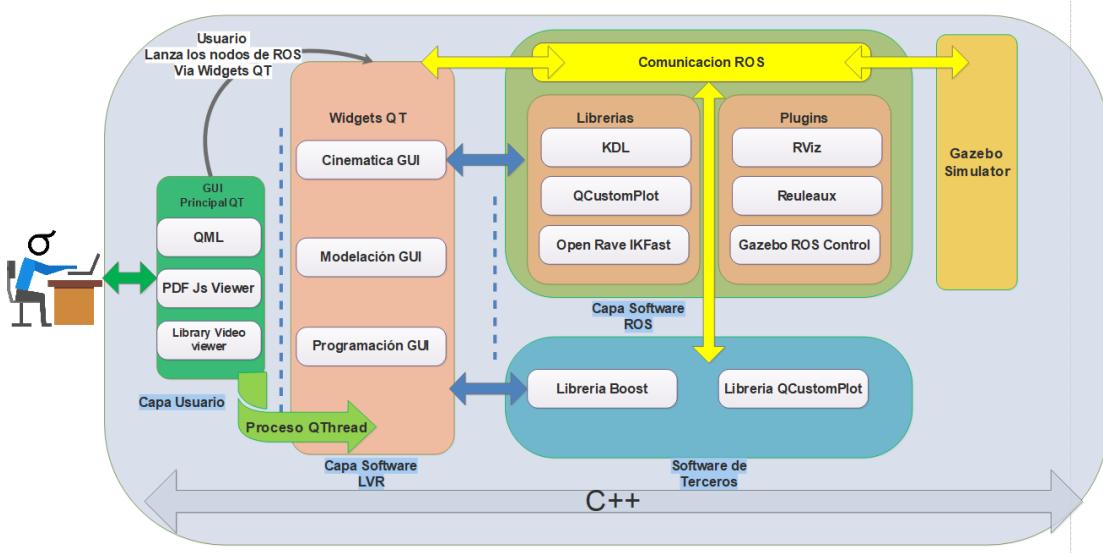


Figura 2.32 Diseño de interfaz principal por capa de software.

### 2.2.2.1 Recursos Bibliográficos

Los recursos bibliográficos del LVR están relacionados con los acápite de la sección 1.3.2 Fundamentos de la robótica industrial. Esto basado en los primeros 4 capítulos del libro de Barrientos et al (2007), los recursos bibliográficos se diseñaron de tal forma que sea un material complementario al libro antes mencionado.

Estos recursos están diseñados bajo el lenguaje QML y un visor de archivos pdf el cual es lanzado vía una página Web bajo el plugin del visor PDF Js Viewer todo esto dentro de la misma Interfaz de usuario, Garantizando además la centralización de la información para el estudiante.

### 2.2.2.2 Recursos Visuales

En el GUI principal se agrega la característica de poder acceder a medios visuales como imágenes o videos para esto usando la librería para QML QtMultimedia 5 esto permitirá al estudiante adoptar un concepto de robótica con medios visuales que le describan de manera más detallada el concepto en la práctica.

### 2.2.2.3 Ejecución de Procesos de ROS

La interfaz de usuario principal es diseñada con la capacidad de ejecutar procesos con solo ejecutar un Widget (Push button o Check box) y lanzar las demás

aplicaciones nodos de ROS que usara el estudiante, (Ver Figura 2.33). Para Lanzar los nodos ROS se usa la Clase de Qt llamada QProcess esta permite iniciar programas externos bajo la administración del usuario al lanzar o eliminar el proceso.

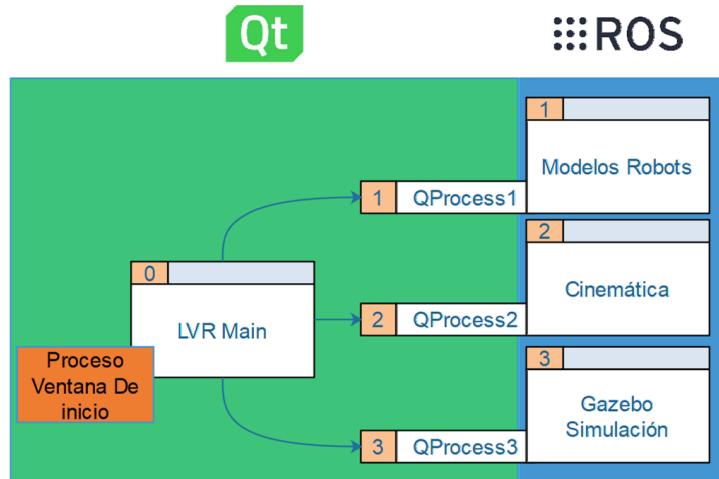


Figura 2.33: Procesos a ejecutarse dentro de la interfaz principal

### 2.2.3 Diseño de la Interfaz Modelación de Robots

La morfología del robot es un concepto muy importante abordado en la Sección 1.3.2 Fundamentos de la robótica industrial. En la interfaz Modelación de Robots se utiliza Widgets de Qt y Plugin de ROS para ejecutar practicas con el estudiante de lenguaje de marcado URDF (Ver sección 2.2.1.2.1 URDF), así a este le permitirá diseñar cualquier robot antropomórfico que desee. En la Figura 2.34 se muestra el diseño general de la interfaz y las herramientas de ROS más destacadas a usar para la implementación como son RViz y KDL, garantizando de esta forma que el estudiante podrá contar con una herramienta de software para construir sus modelos de robots personalizados.

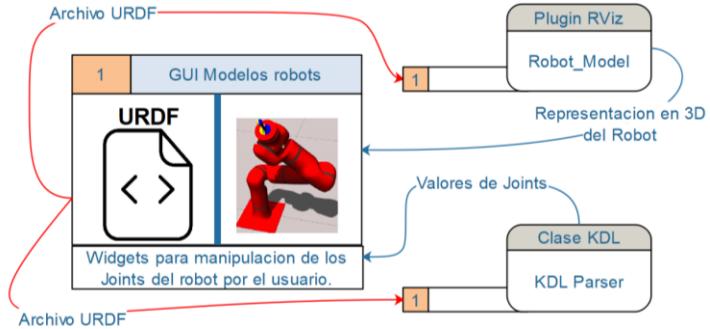


Figura 2.34: Diseño de la interfaz de Modelación de Robots.

## 2.2.4 Diseño de la Interfaz de Matemática y Cinemática de Robots

El diseño de esta interfaz engloba varios aspectos fundamentales para el estudio de los fundamentos de matemática y cinemática de los robots antropomórficos o series (Ver Figura 2.35), usando plugin de RViz para el diseño de las diferentes propiedades de análisis de los robots tales como la Visualización de los archivos CAD de los Robots, Herramientas de interacción del usuario con el robot, visualización del espacio de trabajo de los robots, además del uso de la librería KDL para la conversión matemática de las coordenadas de posicionamiento de los robots, el análisis cinemático y la conversión de marcos de referencia del algoritmo Denavit-Hartenberg, se incorpora además el uso de la librería QCustomplot para graficar los movimientos del robot analizado.

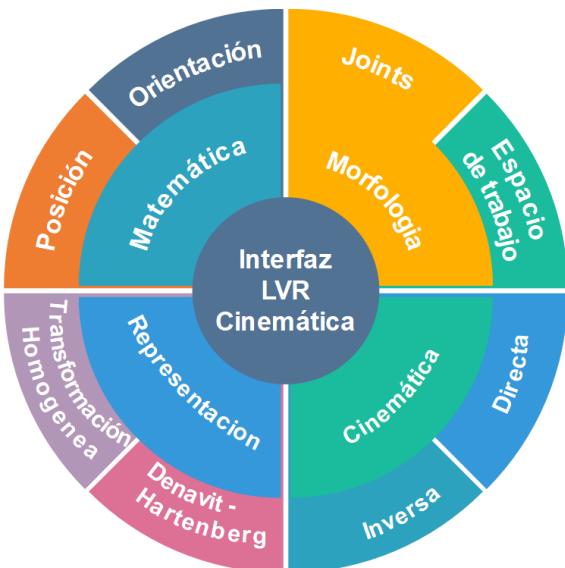


Figura 2.35: Conceptos a desarrollar en interfaz de matemática y cinemática del robot.

El diseño contemplado en la Figura 2.36 esta enfatizado en usar la misma interfaz para el análisis matemático y cinemático de los diferentes tipos de robots cargados por el desarrollador de la interfaz y los estudiantes, solo que con la restricción de que los robots cargados por los estudiantes deben ser diseñados cumpliendo el estándar del etiquetado del archivo URDF de los robots ya cargados.

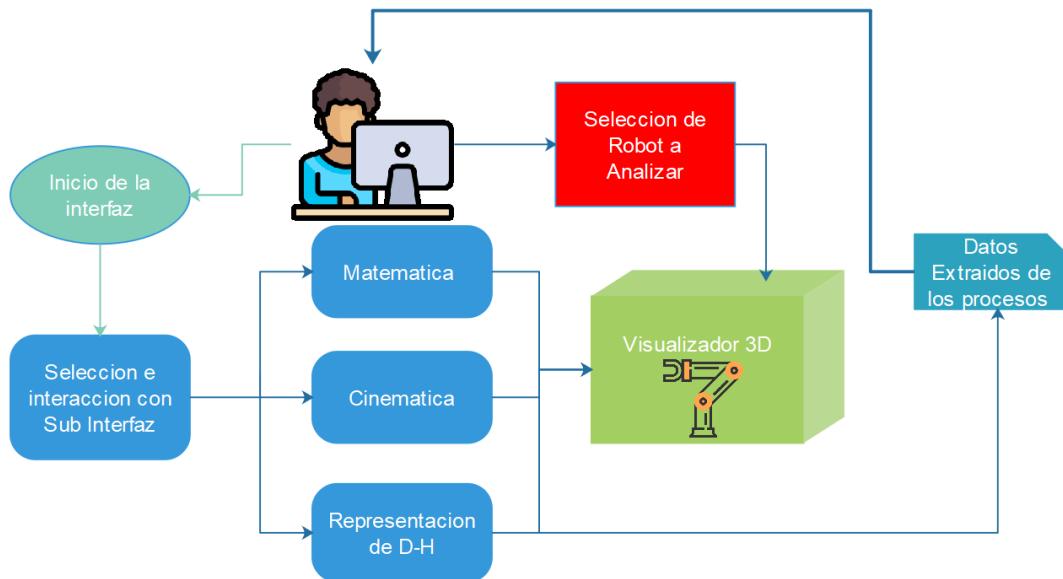


Figura 2.36 Proceso de Interacción con la interfaz de Matemática y cinemática

#### 2.2.4.1 Matemática de los robots

Para entender cómo es que un robot se mueve en el espacio de trabajo es necesario contar con el concepto de posición y orientación de los elementos a manipular con respecto a la base del robot o mundo, dentro de la sub – interfaz de matemática se abordaran conceptos de conversión de coordenadas de posición y orientación de un sólido en un ambiente 3D como se puede observar en la Figura 2.37, esto con el fin de proveer al estudiante de una herramienta útil que le permita apropiarse de estos conceptos. Las Tablas 2.8 y 2.9 muestran las relaciones existentes entre las diferentes representaciones de coordenadas desde la Matriz de Transformación Homogénea que engloba la posición y orientación de un robot hasta la representación singular de diferentes tipos de coordenadas.

Tabla 2.8 Conversión de coordenadas de posición y orientación

Coordenadas de Posición y Orientación				
Matriz de Transformación Homogénea	Conversion	Matriz de posición	Conversion	Coordenadas cilíndricas
				Coordenadas Esféricas
Matriz de Orientación	Conversion	Ángulos de Euler	Conversion	Representación de Cuaternios

Tabla 2.9: Representación Matemática de Coordenadas de Posición y Orientación

Representación	Ecuación
Matriz de Transformación Homogénea	$R_i = \begin{pmatrix} R_{3x3} & p_{3x1} \\ f_{1x3} & w_{1x1} \end{pmatrix} = R_i = \begin{pmatrix} \text{Rotacion} & \text{Traslacion} \\ \text{Perpectiva} & \text{Escalado} \end{pmatrix} =$ $R_i = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & px \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & py \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & pz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$
Matriz de Orientación	$R_i = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix}$
Matriz de posición	$R_i = \begin{pmatrix} px \\ py \\ pz \end{pmatrix}$
Ángulos de Euler XYZ	$\theta = \text{Atan2}(-r_{31}, \sqrt{r_{31}^2 + r_{21}^2})$ $\psi = \text{Atan2}\left(\frac{r_{21}}{\cos \theta}, \frac{r_{11}}{\cos \theta}\right)$ $\phi = \text{Atan2}\left(\frac{r_{32}}{\cos \theta}, \frac{r_{33}}{\cos \theta}\right)$

Representación de Cuaternios	$\epsilon_0 = \frac{1}{2}\sqrt{1 + r_{11} + r_{22} + r_{33}}$ $\epsilon_1 = \frac{r_{32} - r_{23}}{4\epsilon_0}$ $\epsilon_2 = \frac{r_{13} - r_{31}}{4\epsilon_0}$ $\epsilon_3 = \frac{r_{21} - r_{12}}{4\epsilon_0}$
Coordenadas Cilíndricas	$r = \sqrt{px^2 + py^2} \quad \theta = \tan^{-1} \frac{py}{px} \quad z = pz$
Coordenadas Esféricas	$\rho = \sqrt{px^2 + py^2 + pz^2} \quad \theta = \tan^{-1} \frac{py}{px} \quad \varphi = \cos^{-1} \frac{pz}{\sqrt{px^2 + py^2 + pz^2}}$

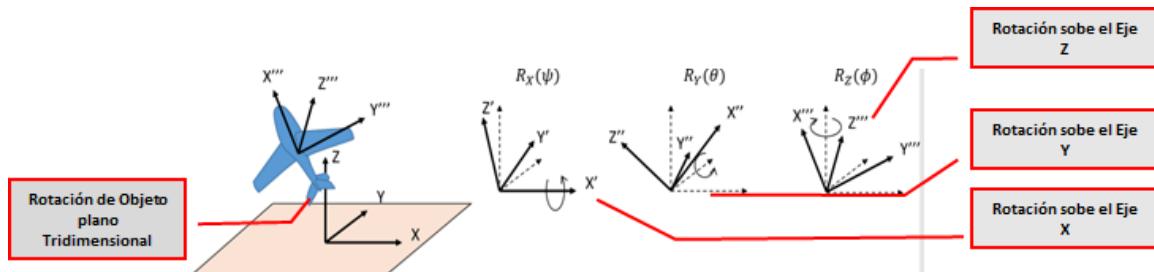


Figura 2.37: Objeto puesto a rotación bajo coordenadas de orientación o Ángulos de Euler XYZ

#### 2.2.4.2 Denavit - Hartenberg

La sub interfaz de Denavit – Hartenberg se diseña de tal forma que el estudiante sea capaz de introducir los valores característicos de Denavit - Hartenberg de cada robot y confirmar esto viendo la visualización de su robot en el ambiente 3D. Se define en el libro de Barrientos, (2007) Fundamentos de Robótica en el capítulo 4.1.3 el desarrollo del algoritmo para obtener los datos antes mencionados y los cuales son descritos posteriormente.

Tabla 2. 10: Parámetros de Denavit - Hartenberg

$\Theta_i:$	Rotación alrededor del eje $z_{i-1}$ .
<b>Vector <math>d_i(0,0,d_i):</math></b>	Traslación a lo largo de $z_{i-1}$ una distancia $d_i$ .
<b>Vector <math>a_i(a_i,0,0):</math></b>	Traslación a lo largo de $x_i$ una distancia $a_i$ .
$\alpha_i:$	Rotación alrededor del eje $x_i$

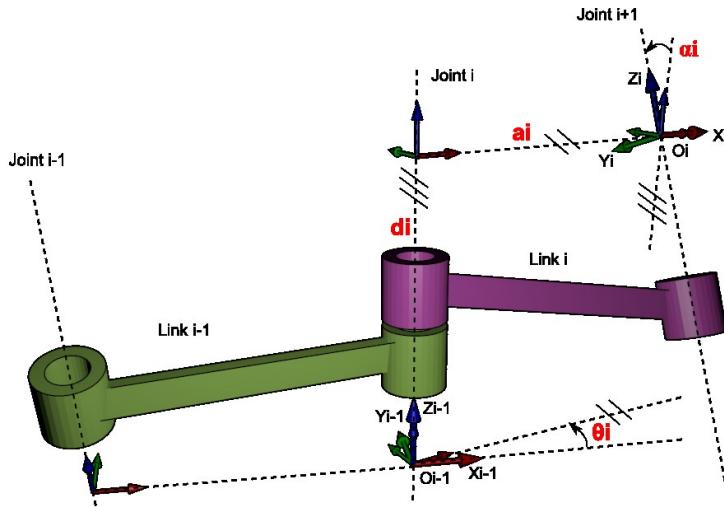


Figura 2.38 Aplicación de Algoritmo Denavit - Hartenberg

Dentro de este desarrollo se usara la librería KDL el cual posee fuunciones que garantizan la construccion de un modelo de robot utilizando los paramentros de Denavit – Hartenberg creando de esta forma una cadena de eslabones que modela el robot a comprobar dentro de la interfaz de forma Visual y matemática.

#### 2.2.4.3 Cinemática de Robots

Dentro del diseño de la sub – Interfaz de Cinemática Directa e inversa se abordará la capacidad de que el estudiante entienda el concepto de Cinemática directa e inversa abordado en la sección 1.3.2.3 usando las Herramientas y plugin de ROS enunciados en la Tabla 2.10, para esto se ha asociado los diferentes modelos en URDF diseñados por el desarrollador y los modelos diseñados por el fabricante y se ejecuta un conjunto de procesos con las diferentes librerías para obtener los datos de interés de la cinemática.

Cabe destacar que para la resolución del problema cinemático directo existen varios métodos, el más común y más practico es el abordado en la sección 2.2.4.2 Denavit - Hartenberg del cual se obtiene una representación del modelo del robot simplificada sin importar el número de Joints a analizar. Otro método es el de uso de Cuaternios para la cinemática directa el cual no será abordado en este diseño, pero el cual es válido mencionar.

Para la cinemática inversa es necesario el uso de algoritmos más sofisticados para obtención de los datos de interés, ya que para una posición y orientación de

un robot hay un sin número de Posibles soluciones de acuerdo a la morfología del robot. Para este análisis se utilizará KDL de forma general e IkFast para análisis de la accesibilidad (Espacio de Trabajo) de un robot arrojando como resultado el espacio de trabajo.

*Tabla 2.11: Tabla de Paquetes de la interfaz de Matemática y Cinemática de Robots*

Paquete	Categoría	Propósito de Aplicación	Capítulo vinculado
Orocos_KDL	Librería de Cinemática	Cinemática Directa e inversa a través de URDF.	2.6.1, 2.6.2, 2.6.3
TF ROS	Librería de Transformaciones	Cambio de marcos de referencia del robot.	2.6.1
Reuleaux	Plugin de Rviz	Muestra el espacio de Trabajo de robots industriales	2.6.3
IkFast	Módulo de Open Rave	Generador de Archivo que describe la cinemática del robot	2.6.3
RViz	Visor de datos 3D de ROS	Se usa el código fuente (Librerías y Plugins) del visor de ROS para incorporarlo en la Interfaz del LVR	2.5, 2.6.1, 2.6.2, 2.6.3
QCustomPlot	Librería de Gráficos	Uso para las graficas de movimientos de los Joints	2.6.3

## 2.2.5 Diseño del módulo de Programación de los Robots.

Como se define en la sección 1.3.2.4 Programación y simulación del robot es de vital importancia para el desarrollo de los fundamentos de la robótica, el Uso de Gazebo cobra importancia al combinarlo con una interfaz de usuario que envía los parámetros de configuración del robot a controlar, cabe destacar que cada robot posee su propia morfología, cinemática y dinámica característica, para el control

de cada modelo es necesario ajustar los parámetros del control PID para cada Joint del robot. (Ver figura 2.39)

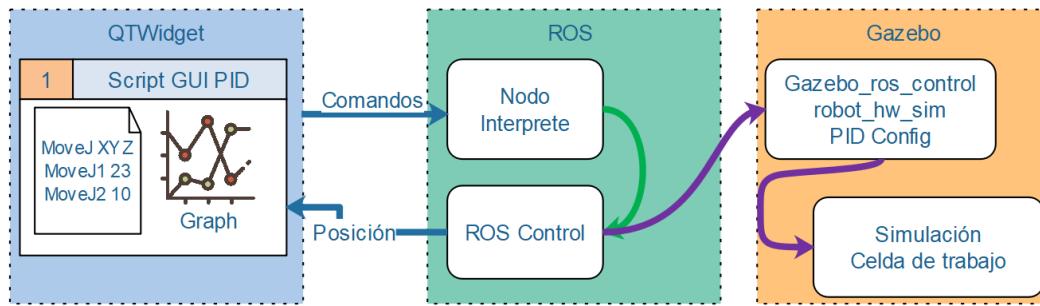


Figura 2.39: Interacción de Gazebo con ROS e interfaz de usuario

### 2.2.5.1 Gazebo Celda de trabajo.

La celda de trabajo se diseña lo más acertada posible a una celda de trabajo física permitiendo al estudiante una cercanía virtual del ambiente de trabajo con un robot en una fábrica, como se describe en la sección 2.1 Diseño del LVR.

El mundo simulado en Gazebo cuenta con la capacidad de añadirle modelos 3D y definir las colisiones con la cual el robot puede verse afectado su trabajo al moverse en el espacio 3D. Si se cuenta con el modelo se definen los plugins de interacción con el mundo y ROS en este trabajo se utiliza el plugin de ros\_control ver Figura 2.40.

## GAZEBO + ROS + ros\_control

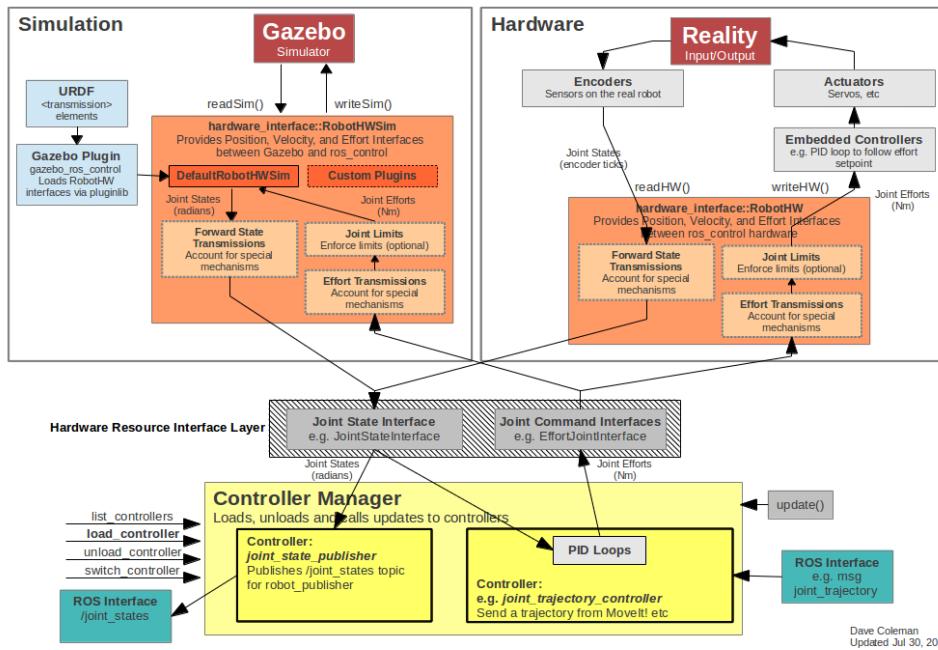


Figura 2.40: ros\_control y su interacción con el mundo de Gazebo. Tomado de: [http://gazebosim.org/tutorials/?tut=ros\\_control](http://gazebosim.org/tutorials/?tut=ros_control)

```
<gazebo>
  <plugin name="gazebo_ros_control" filename="libgazebo_ros_control.so">
    <robotNamespace>/MYROBOT</robotNamespace>
    <robotSimType>gazebo_ros_control/DefaultRobotHWSim</robotSimType>
  </plugin>
</gazebo>
```

xml WORLD Gazebo

Con el plugin de ros\_control se posee la capacidad de configurar los parámetros del robot simulado y el del robot real simultáneamente usando control PID, dentro de este trabajo solo se explota la simulación del robot dentro del mundo de gazebo. El anterior Script muestra una parte del archivo .WORLD de Gazebo a configurar para agregar el plugin de ros\_control al mundo.

### 2.2.5.2 Diseño de la interfaz interprete de comandos.

La interacción del usuario con el robot a simular se realizará a través de una interfaz de usuario donde se escribirá el Script de Control de cada Joint del robot a controlar, una opción de configurar el PID de cada elemento del robot y la capacidad de ver las gráficas del movimiento de los Joints del robot. Como se

muestra en la Figura 2.39. En la tabla 2.11 se muestra los paquetes y librería de ROS y las herramientas del Simulador gazebo utilizados.

*Tabla 2.12: Paquetes utilizado para la programación y simulación del Robot en Gazebo*

Software	Categoría	Propósito de Aplicación	Capítulo vinculado
<b>Gazebo</b>	Simulador	Modelación del mundo virtual para simular el robot.	2.7
<b>ros_control</b>	Librería de control	Controlar los Joints del robot utilizando PID	2.7
<b>Kuka ros_industrial</b>	Modelos de robot	Robot Kuka a simular dentro del mundo	2.7
<b>Joint_state messages</b>	Mensajes de ROS	Mensajes de la posición del robot que son tomados de la simulación	2.7

## 2.3 Implementación del LVR

En el acápite anterior se describieron los diferentes recursos del laboratorio virtual. A continuación, se explica el procedimiento y el uso de las herramientas para la implementación del LVR con sus diferentes subsistemas de software.

### 2.3.1 Implementación de la interfaz principal.

La implementación de esta interfaz a como se describe en la sección de requerimientos del capítulo 2.4, se realiza utilizando Qt Creator.

En la figura 2.41 se muestra la implementación de la interfaz principal.

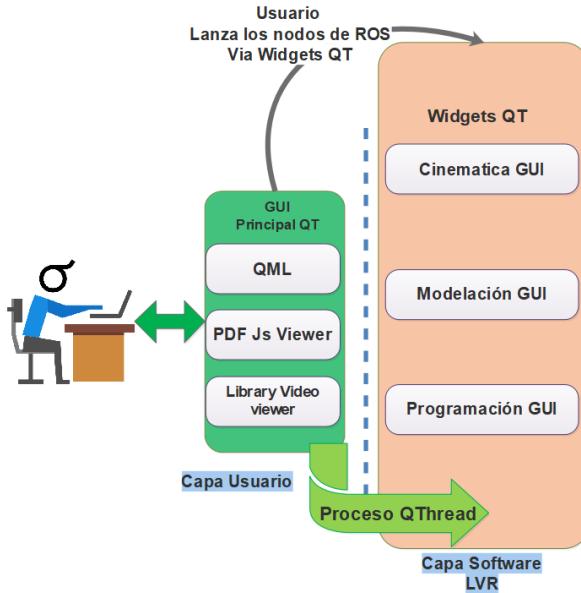


Figura 2.41: Diseño Interfaz Principal

La interfaz principal hace uso de QML un lenguaje de programación de Qt-Creator que en esencia cualquier programador web reconocería como similar a el etiquetado de un archivo HTML. Con QML se define un encabezado principal (Header) y un cuerpo donde se definen los diferentes Widgets de la interfaz como botones o párrafos de texto, etc. El uso de llamada o vínculo de otros módulos escritos en QML muestran la interfaz gráfica de una forma dinámica y atractiva.

```

import QtQuick 2.9
import QtQuick.Controls 2.2
import QtQuick.Window 2.3
import QtQml.Models 2.1
import "qml"

Window {
    id:mainsc
    visible: true
    width: Screen.width-45
    height: Screen.height
    title: qsTr("Virtual Laboratory")

    Welcome {
        id:welcome
    }
    MainLab{
        id:mainLab
    }
}

```

Main QML

Figura 2.42 Muestra de parte del código principal.

En la figura 2.42 se agregan dos ítems Welcome Y Main Lab estos son los dos archivos QML Gestionados para acceder a la pantalla de bienvenida y Pantalla de navegación entre los diferentes ítems del LVR.

En el Item Welcome (Pantalla inicial) se muestra una introducción al estudiante de los diferentes recursos del LVR, Esta interfaz (Figura 2.43) cuenta con Diálogos, Botones, imágenes Planas e imágenes Gif, un Script en JavaScript que gestiona la hora y el tiempo que el usuario utiliza el LVR.



Figura 2.43: Pantalla de Bienvenida al LVR

Cuando el usuario Ingresa al LVR (Ítem MainLab) se puede acceder al menú principal de los recursos de lectura, visuales y animados de la interfaz y lanzar de manera transparente los nodos de ROS para las practicas. Esta interfaz se a decidido clasificarla en 4 diferentes categorías, Recursos bibliográficos y visuales, Morfología y modelación de robots, Cinemática de robots y simulación de robots como se puede observar en el Figura 2.44



Figura 2.44 Muestra de la pantalla principal.

### 2.3.1.1 Recursos Bibliográficos

Para mostrar los recursos bibliográficos dentro de la interfaz gráfica de usuario se utilizó un visor de archivos en PDF de libre acceso llamado PDF.Js gestionado y administrado por Mozilla Labs, esta librería necesita de un navegador Web para mostrar los archivos referenciados vía un enlace Web ya sea apuntando a un archivo que se encuentre localmente en una PC o en un servidor FTP, en nuestro caso lo hacemos localmente, referenciando a los diferentes archivos PDF que son necesarios para el material de robótica de este LVR.

```

Configuración del
WebEngine
Estado en
Programación QML
Archivo PDF a
Mostrar.

WebView {
    id: webView
    anchors.fill: parent
    KeyNavigation.priority: KeyNavigation.BeforeItem
    settings.focusOnNavigationEnabled: false
    onContextmenuRequested: function(request) {
        request.accepted = true
    }
}

State {
    name: "ROSFund"
    when: tabBar.currentIndex==1
    PropertyChanges {
        target: webView
        url: "qrc:/3rdParty/pdfjs-1.7.225-dist/web/viewer.html"+"?file="+"qrc:/pdf/Barrientos.pdf"
    }
}

```

Figura 2.45 Configuración de la librería PDF.Js en QML

En la Figura 2.45 se muestra el uso del QtWebEngineView de QML el cual es un Módulo de Qt Renderizador de páginas Web basado en la versión libre de Google Chromium, el cual soporta cualquier tecnología Web, en la programación del

módulo se le referencia el link del URL a cargar dentro del proceso Web, permitiendo de esta manera mostrar los recursos en PDF, Ver Figura 2.46.



Figura 2.46 Recurso Bibliográfico dentro del LVR.

### 2.3.1.2 Recursos Visuales

Los recursos visuales dentro del LVR son de importancia al permitir al estudiante adoptar el concepto objeto de estudio de una forma visual e interactiva, para el desarrollo de este requerimiento se hizo uso de QtMultiMedia 5 un módulo nativo de QML que al editar las propiedades (Ver Figura 2.47) se le puede programar como un reproductor de video dentro de la interfaz

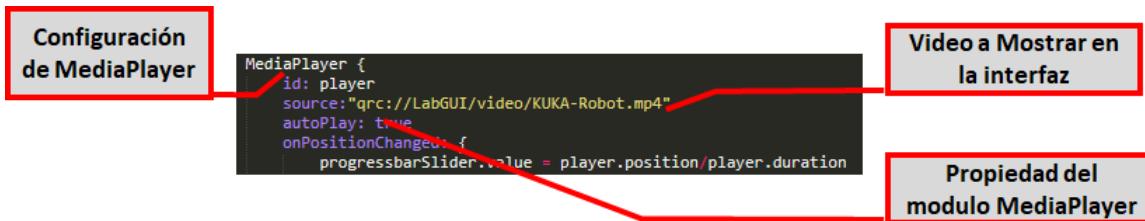


Figura 2.47 Propiedades del Módulo de Reproducción de Video.

En la Figura 2.48 se muestra contenido multimedia de este laboratorio virtual de robótica, este reproductor de contenido cuenta con una barra de herramientas para el control y volumen de la reproducción. Se han incluido diferentes tipos de videos ya sean tutoriales o ejemplos donde se aplica el uso de robots, la mayoría de los videos son provenientes de Youtube y Vimeo.

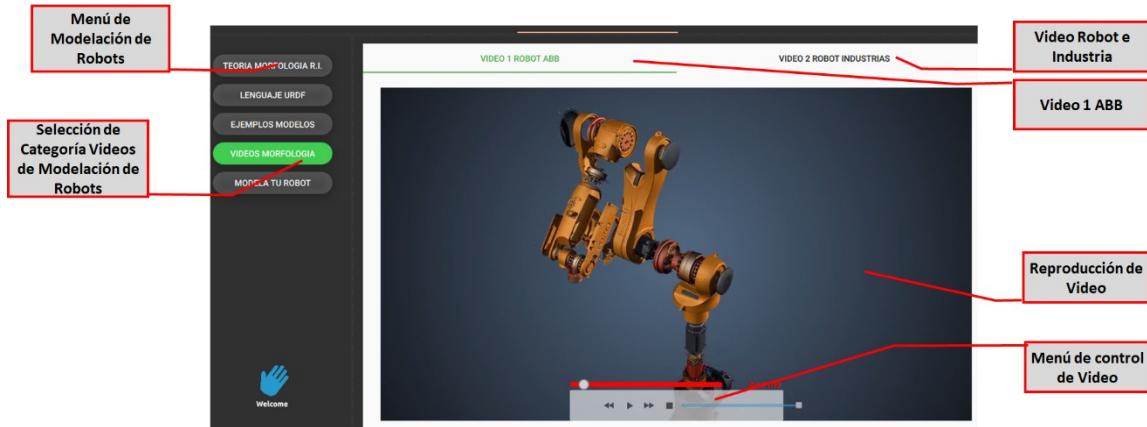


Figura 2.48: Contenido Multimedia en la interfaz del LVR.

### 2.3.1.3 Ejecución de Procesos de ROS

Como se muestra en la Figura 2.33 la interfaz principal es necesario que cuente con la capacidad de lanzar y administrar los nodos de ROS en caso de que se tenga que detener el proceso para dar chance a otra practica que desea ejecutar el estudiante, los procesos hijos de la interfaz principal pueden iniciarse por separado en algún punto del código.

La Clase a utilizarse se llama QProcess la cual está escrita en C++, y debido a que la interfaz principal está escrita en QML, se aprovecha la Capacidad de QT para poder importar una clase de C++ a la interfaz, demostrando de esta manera que se puede implementar con QML una interfaz dinámica y capaz de comunicarse con cualquiera de las numerosas librerías escritas en C++.

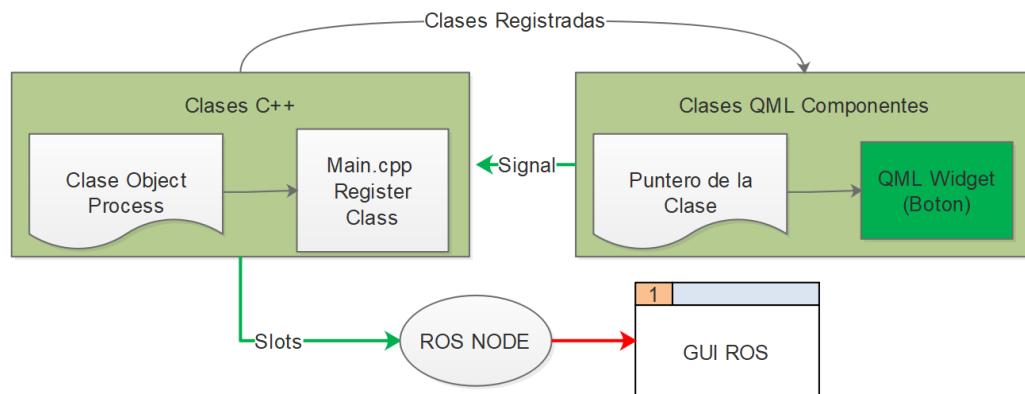


Figura 2.49: Clases en C++ y Componentes de QML

En la Figura 2.49 se muestra el proceso ejecutado para ejecutar clases de C++ con QML donde un Widget (Botón) emite una señal al objeto de la Clase a ejecutar la cual en nuestro caso es un proceso hijo de la aplicación principal que lanza un nodo de ROS, en la Figura 2.50 se especifica la lógica del objeto en C++, donde primero se Eliminan (Kill) los procesos relacionados con una práctica, y evitar abrir por ejemplo la interfaz de cinemática repetidas veces, o tener nodos repetidos con diferente flujo de información, Se configura el proceso a ejecutar, y se apunta a la función (Start) dentro de la clase QProcess, la cual espera un comando en String para ejecutar un Proceso, en nuestro caso en la figura se observa la definición del proceso hacia un nodo ROS con el comando *rosrun* (Ver Tabla 2.2: Comandos ROS)

```
process->start("Comando")
```

*Launcher.cpp*



Figura 2.50: Código de la clase en C++ Registrada en QML

### 2.3.2 Implementación de la Interfaz Modelación de Robots

En la sección 2.2.3 Diseño de la Interfaz Modelación de Robots se especifica la interacción de la escritura de un URDF que puede ser editado por el usuario cambiando las dimensiones de los eslabones, el tipo de Joints (Figura 2.51) o especificando en grados las aperturas de los ángulos de los mismos, una vez editado los cambios del URDF son mostrados automáticamente en el visor de robots RViz.

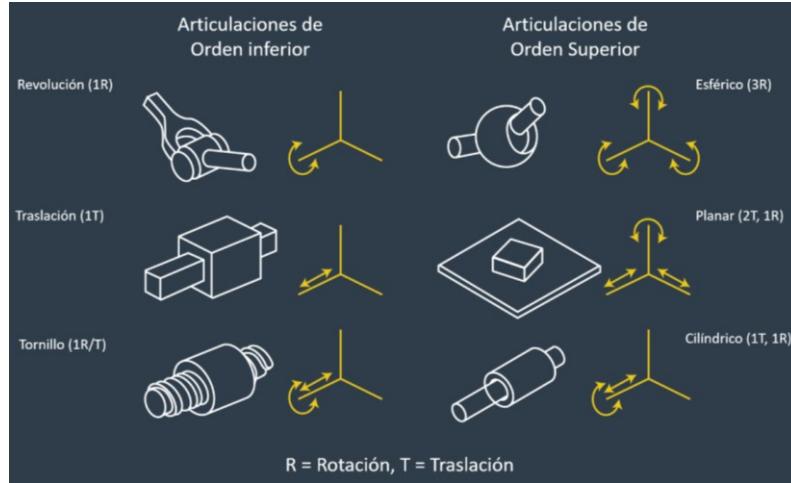


Figura 2.51: Tipos de Joints

### 2.3.2.1 Creación de Interfaz en Qt.

La creación de la interfaz Qt cumple análogamente el lineamiento de desarrollo Web, en el que se cuenta con el Front End y el Back End Mencionado en la sección 1.3.1 Interfaz gráfica de usuario (GUI). Se implemento la creación de la Ventana de Modelación de Robots utilizando Widgets QT, con Cuatro secciones de importancia:

- 1) Visualización del Script en URDF.
- 2) Un Panel de herramientas para gestionar el Guardado y Visualización del Robot.
- 3) Un Widget donde se vincula el Visor 3D RViz para poder Ver el Robot
- 4) Un panel de Widgets Slider para el control de los eslabones.

Todas estas funcionalidades especificadas en la Figura 2.34.

Dentro de la programación de la interfaz al usar los Widgets más comunes se decidió agregarle un complemento visual a la edición de los parámetros del URDF, asemejándose a los programas de edición de software básicos, como el autocompletado y resaltado (HighLight) de palabras reservadas.

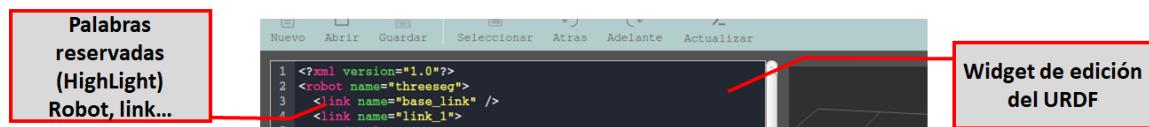


Figura 2. 52: Palabras reservadas dentro de la interfaz.

### 2.3.2.2 Programación de los recursos de ROS

Se mencionará en esta sección que el desarrollo de la programación de los recursos de ROS en la modelación de los Robots, Cinemática y programación se enfoca a crear un sistema no convencional al usar ROS, con esto se hace referencia al hecho de garantizar al estudiante un sistema transparente. Donde este no tenga el requerimiento de saber el funcionamiento y la puesta en marcha de las herramientas de ROS.

Por ejemplo, una vista común del uso del visualizador de Robots RViz es la mostrada en la Figura 2.53 el cual muestra la ventana de visualización típica de RViz con muchos plugin cargados que podrían dificultar el uso si se hubiese hecho un LVR con las mínimas configuraciones y lógica de programación en C++. En Cambio, en la Figura 2.56 se muestra el desarrollo de la ventana de Modelación de Robots enfocada a un proceso de aprendizaje específico, valga la redundancia Modelar Robots solamente.

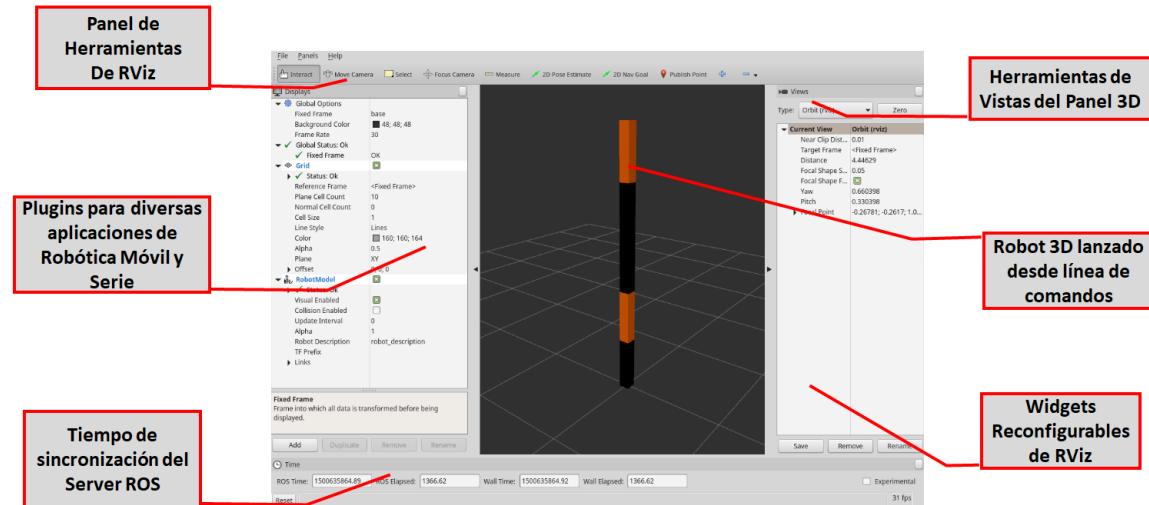
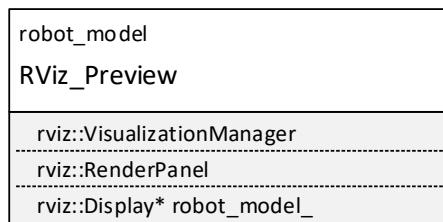


Figura 2.53: Vista de RViz Por Default.

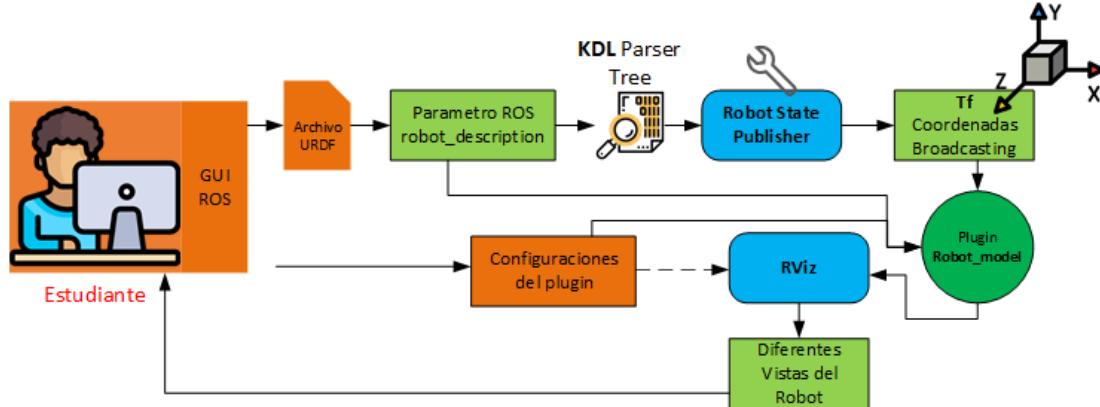
La GUI programada con C++ es un paquete dentro de ROS a ser compilado, (Ver sección 2.1.2.3) donde cada widget de Qt para la interacción dentro de la interfaz de usuario crea varios procesos con ROS mostrados en la Figura 2.54, plasmando de este modo el modelo de software a seguir para ver el modelo de robot creado y personalizado por el estudiante, donde este debe editar el archivo URDF para construir su modelo, sí el modelo tiene una sintaxis de lenguaje de marcado xml

con las propiedades de URDF, se registra como un parámetro dentro de ROS bajo el Topic *robot\_description* este es Leído por una Función de la clase KDL\_Parser la cual crea un objeto KDL\_Tree, donde se especifica la estructura del robot definido en el archivo URDF editado, Este Objeto KDL\_Tree es publicado en un tópico llamado *robot\_state\_publisher* el cual publica en ROS las coordenadas de cada Elemento y Joint del Robot.

```
robot_model_->subProp("TF Prefix")->setValue("robot_editor");
robot_model_->subProp("Robot Description")->setValue("robot_description");
robot_preview.cpp
```



```
robot_state_pub_->publishFixedTransforms("robot_editor");
robot_editor.cpp
```



*Figura 2.54: Representación secuencial del modelo de software de Modelación de Robots.*

Con el Puntero *robot\_state\_pub\_* se define además el nombre del marco de referencia al que estará anclado el robot, como se puede apreciar en el código anterior. Esto da paso al uso del plugin de RViz *robot\_model* que Muestra una representación visual del modelo 3D publicado como parámetro en *robot\_description*, el plugin *robot\_model* es activado dentro de la clase de RViz *render\_panel* la cual es incorporada dentro del Widget que espera el escenario 3D.

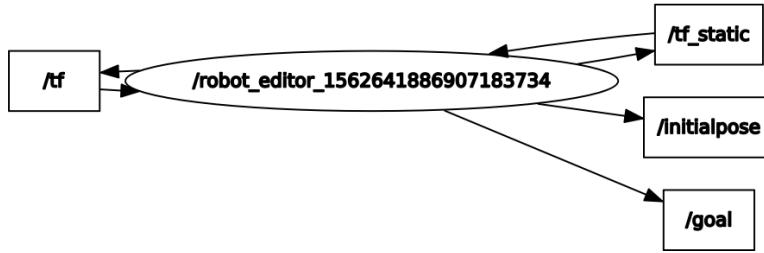


Figura 2. 55: Nodos y Tópicos en Interfaz interactuando bajo ROS

El resultado del desarrollo de esta interfaz es mostrado a continuación en la Figura 2.56, La cual cuenta con la ventana de edición con autocompletado y resaltado de las palabras reservadas (highlight), un conjunto de Widgets que mueven el robot a los ángulos de los Joints editados por el estudiante, el panel de visualización del robot en 3D y un conjunto de herramientas para control de la ventana. Esta ventana es un nodo de ROS que es lanzado desde la aplicación principal como se definió en la sección 2.3.1.3 Ejecución de Procesos de ROS.

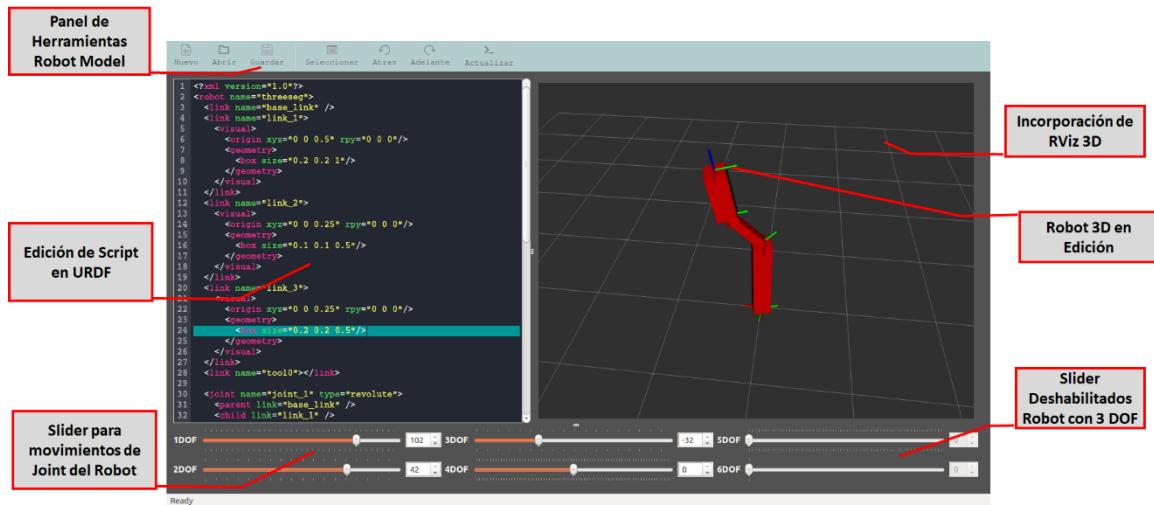


Figura 2.56: Interfaz Modelación de Robots.

En la Figura 2.57 se puede observar un ejemplo de edición con un archivo URDF cargado dentro de la interfaz, observando las alteraciones de las dimensiones del diseño de un Robot cilíndrico.

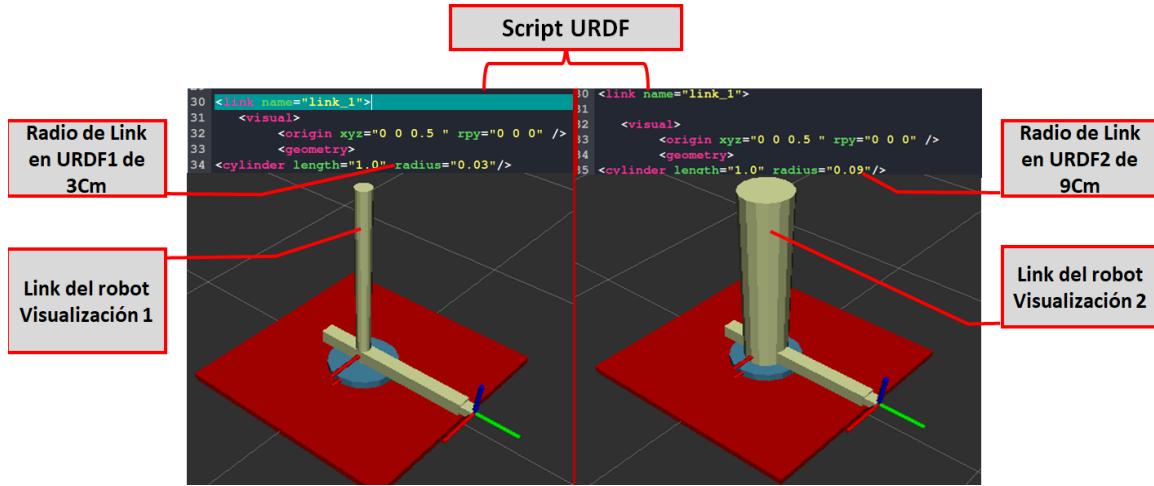


Figura 2.57: Ejemplo de la edición de los parámetros de un robot con un script URDF.

### 2.3.3 Implementación de la Interfaz de Matemática y Cinemática de Robots

El proceso de desarrollo de esta interfaz y la visualización del robot virtual se hace siguiendo el desarrollo de la sección 2.3.2 Implementación de la Interfaz Modelación de Robots, salvo que en esta interfaz se trabajara con modelos de robots ya creados por el desarrollador de este trabajo monográfico y los modelos de robots de los fabricantes como ABB, Fanuc, Kuka, Motoman entre otros, los cuales han sido verificados comparando el modelo con el usado por software del fabricante. (Ver sección 2.2.1 Modelos de los robots) Además en la implementación de esta interfaz se incluyen más plugins y librerías de ROS en C++.

#### 2.3.3.1 Creación de Interfaz en Qt.

Para la implementación de esta interfaz fue necesario definir varios procesos de software en C++ con características de comportamiento estándar de manejo de los diferentes modelos de Robots cargados, intercambio de información de los nodos, configuración de los plugin de ROS, etc. Donde la incorporación de los Widgets de Qt cobra importancia para hacer de la interfaz lo más transparente posible.

Cada Widget utilizado posee señales (signal) y slots de funciones para la realización de una acción dentro del código, cada interacción con la GUI del LVR es usando estos recursos de Qt. (Ver Figura 2.57)

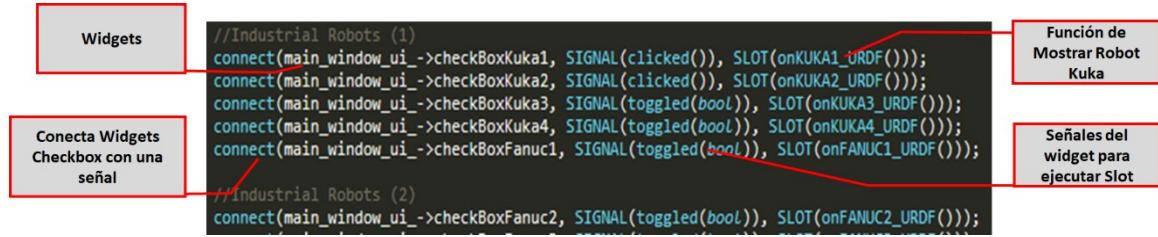


Figura 2. 58: Señales y Slots con funciones dentro del código de la interfaz principal.

Las secciones de la interfaz desarrollados bajo los widgets de Qt son:

- 1) Visualizador 3D de robots virtuales
- 2) Selección de los robots dentro de la interfaz.
- 3) Análisis de la Matemática del robot.
- 4) Comprobación de Cinemática Directa.
- 5) Comprobación de Cinemática Inversa.
- 6) Modelar robot con Algoritmo de Denavit Hartenberg
- 7) Gráficos de los movimientos de Joints.

### 2.3.3.2 Programación de los recursos de ROS

Cada subinterfaz en Qt posee nodos, servicios o vinculación de plugin visuales de ROS que permiten mostrar la información de robótica industrial necesaria para este LVR.

#### 2.3.3.2.1 Visualizador 3D de robots virtuales

Para visualizar el robot se sigue el mismo algoritmo plasmado en la Figura 2.54 de la interfaz de modelación de robots, además se configura las herramientas del visualizador RViz como Zoom, Selección de sólidos, Herramienta de medición del espacio 3D, y se agrega el Plugin de Reuleaux, para el análisis del espacio de trabajo, Todo esto en Widgets de fácil acceso al estudiante (Usuario) para activarlos o desactivarlos.

Al agregar el robot virtual en el ambiente 3D como se plantea en la sección 2.3.2 Implementación de la Interfaz Modelación de Robots se puede proceder a agregar más funcionalidades al visualizador 3D. Se agrega las librerías de RViz para la programación de las herramientas del visualizador 3D como se observa en la Figura 2.59 se programa en C++ un puntero de la clase de RViz llamado ToolManager que administra la activación de la herramienta dentro del panel 3D.

```

76     // Create an interaction tool...
77     tm=new rviz::ToolManager(manager_);
78     tm = manager->getToolManager();
79     interactTool_ = tm->addTool("rviz/Interact");
80     pointTool_ = tm->addTool("rviz/PublishPoint");
81     measureTool_ = tm->addTool("rviz/Measure");
82     selectTool_ = tm->addTool("rviz/Select");
83     moveCamera_ = tm->addTool("rviz/MoveCamera");
84     focusCamera_ = tm->addTool("rviz/FocusCamera");

```

**Herramientas agregadas al panel 3D de RViz**

**Creación de Puntero de la Clase ToolManager**

Figura 2.59: Herramientas del panel 3D de RViz

Las herramientas dentro del panel 3D facilitan el estudio del objeto cargado (Ver Figura 2.60), por ejemplo, al cargar un Robot industrial se puede utilizar la herramienta de medición para conocer o confirmar las dimensiones del robot industrial, otro ejemplo es la posibilidad de ver el Robot bajo la herramienta TF con o sin los archivos CAD cargados, como objeto de estudio del robot para conocer los puntos de intersección de los Joints y eslabones

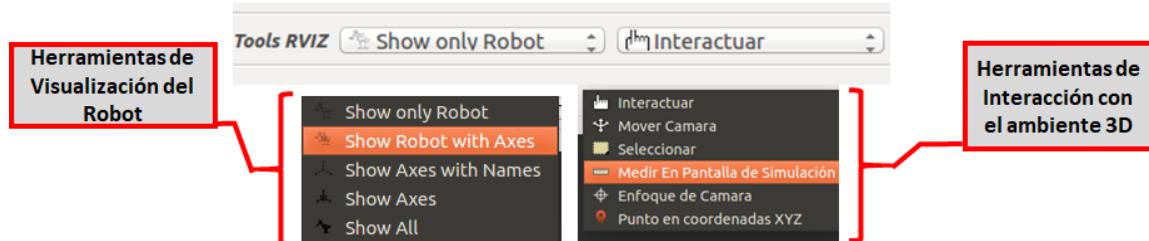


Figura 2.60: Herramientas de Visualización

Otro plugin dentro de la Visualización del ambiente en RViz es Reuleaux (Ver sección 2.1.6) en la Figura 2.18: Proceso de ROS para gestionar la Visualización del espacio de trabajo, Se describe la obtención de los datos de cada robot dentro del ambiente 3D cargado.

Reuleaux es un plugin de propósito general que se configura al visualizador RViz, en la incorporación a nuestro LVR se ha editado el código fuente de este plugin (Ver Figura 2.61) ya que se pretende que este sea lo más transparente posible al estudiante, se incorpora el plugin dentro del visualizador del LVR y se añaden herramientas vía el uso de Widgets de Qt para desactivar o activar el espacio de trabajo, o Cambiar el índice de alcance del robot dentro del espacio de trabajo.

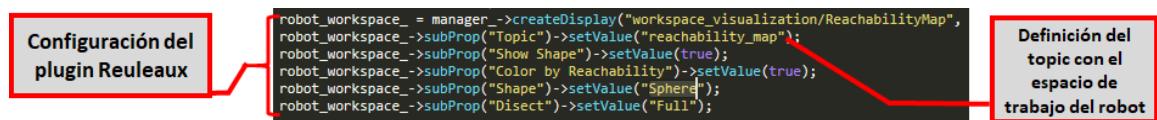


Figura 2.61: Configuración del plugin Reuleaux

Cada robot posee su espacio de trabajo por lo cual usando los archivos en C++ generados con IKFast del módulo de OpenRAVE (2.1.5 Open Rave IkFast), se genera vía las nodos de Reuleaux archivos H5 (Arreglo de datos en forma jerárquica) que guardan todas las posiciones posibles de la cinemática especificada en el archivo en C++ de IKFast.

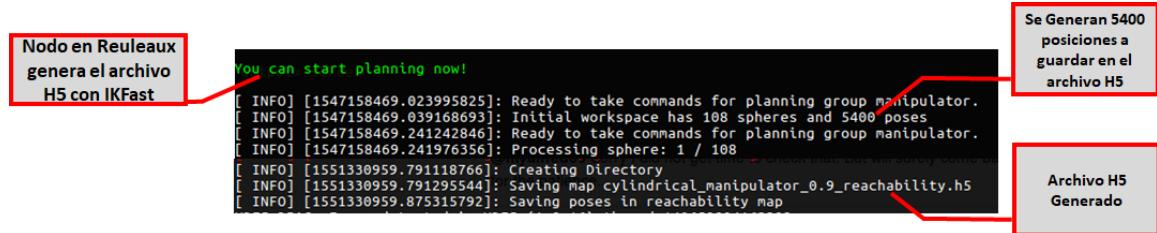


Figura 2.62: Reuleaux generando archivo para mostrar espacio de trabajo.

En la Figura 2.63 se muestra el espacio de trabajo de un robot Kuka, el cual es un proceso de visualización en el ambiente 3D gestionado por el plugin Reuleaux al cargar esferas vía las coordenadas del archivo H5, estas esferas son de diferentes colores dependiendo del índice de alcance del robot, Azul indica múltiples poses por parte del robot de alcanzar la posición, Verde y amarillo con pocas poses y rojo una pose que se alcanza por el robot solo con al menos 2 posiciones posibles.

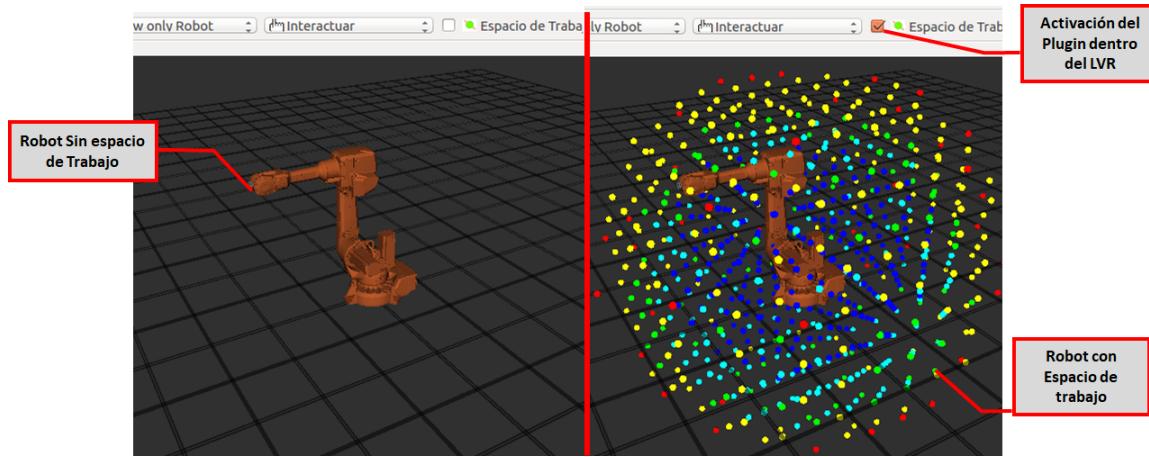


Figura 2.63: Espacio de Trabajo de un Robot Kuka.

### 2.3.3.2.2 Selección de los robots dentro de la interfaz.

Como se menciona en la sección 2.2.1 Modelos de los robots, en este laboratorio virtual hay modelos de usuario (desarrollador) y modelo de fabricante de robots todos modelados en URDF los cuales se cargan al LVR de una forma transparente, siguiendo diferentes algoritmos en C++ para actualizar los plugin de Visualización del robot, espacio de trabajo y cálculos de la cinemática para cada robot a como se muestra en la Tabla 2.12.

Tabla 2.13: Robots seleccionados dentro de la interfaz

<b>Robots Clásicos</b>	<b>Robots Simples</b>	2 grados de libertad	
		3 grados de libertad	
	<b>Puma 560</b>		

	Cilíndrico	<p>INFO 1 2 3 4 5 DOF Grados / Meters 1 29.00 ° X -0.385107 Meters 2 31.00 ° Y 0.694751 Meters 3 14.00 ° Z 0.666052 Meters 4 0.00 ° Yaw 29 ° 5 0.00 ° Pitch 0 ° 6 0.00 ° Roll 0 ° 1DOF 2DOF 3DOF 4DOF 5DOF TOOL R3x3 P3x1</p>
Robots industriales	ABB IRB 2600	<p>INFO 1 2 3 4 5 DOF Grados / Meters 1 0.09 ° X 1.03 Meters 2 0.00 ° Y 0 Meters 3 0.00 ° Z 1.26 Meters 4 0.00 ° Yaw 0 ° 5 0.00 ° Pitch 0 ° 6 0.00 ° Roll 0 ° 1DOF 2DOF 3DOF 4DOF 5DOF TOOL R3x3 P3x1</p>
	Yaskawa MH5	<p>INFO 1 2 3 4 5 DOF Grados / Meters 4 -42.21 ° Yaw 3.56674e-1 ° 5 29.75 ° Pitch 4.6001e-10 ° 6 58.82 ° Roll 1.5412e-10 ° 1DOF 2DOF 3DOF 4DOF 5DOF TOOL R3x3 P3x1</p>

### 2.3.3.2.3 Análisis de la Matemática del robot.

En esta subinterfaz del LVR el estudiante usara los diferentes widgets y Modelos 3D cargados al plugin RViz para comprobar las coordenadas de posición y orientación descritas en la Tabla 2.9: Representación Matemática de Coordenadas de Posición y Orientación. Para esto se usan las librerías de TF para alterar la posición y orientación de la base del objeto a analizar entro del LVR como se muestra en la Figura 2.64

**Aplicación de Ecuaciones en C++**

```
//Cartesian
Z = rSph * cos(phiSph);
Y = rSph * sin(phiSph) * sin(thetaSph);
X = rSph * sin(phiSph) * cos(thetaSph);

phiC = phiSph;
rhoC = rSph * sin(thetaSph);

odom_trans.transform.translation.x = X;
odom_trans.transform.translation.y = Y;
odom_trans.transform.translation.z = Z;

odom_trans.header.frame_id = "my_lab_world";
odom_trans.child_frame_id = "my_lab_world/base_link";
odom_trans.header.stamp = ros::Time::now();
broadcaster.sendTransform(odom_trans);
```

**Puntero en C++ odom\_trans**

**Publicación del Puntero para alterar la posición del objeto**

Figura 2.64: Aplicación en C++ de la Matemática del Robot dentro del LVR

Se describen a continuación dos ejemplos de uso de la matemática del robot usando un Modelo de un cubo en 3D para observar la traslación de un objeto en el ambiente 3D y el Modelo de un avión en 3D para mostrar el ejemplo clásico de los ángulos de Euler.

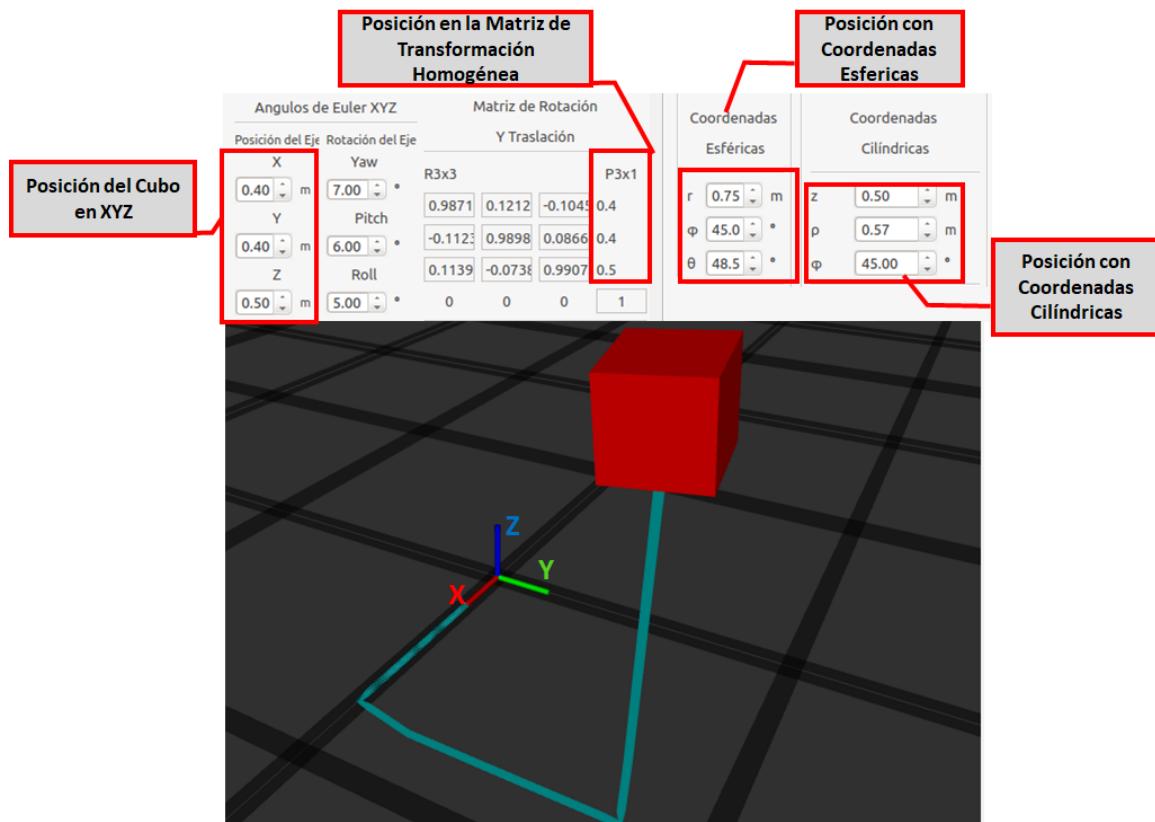


Figura 2. 65: Posición del Modelo 3D

El cubo mostrado en la Figura 2.65 Posee una posición en Coordenadas XYZ que es Mostrada en la Matriz de Transformación Homogénea, su respectiva conversión a Coordenadas esféricicas y Cilíndricas, tal posición es mostrada en el Visualizador del LVR.

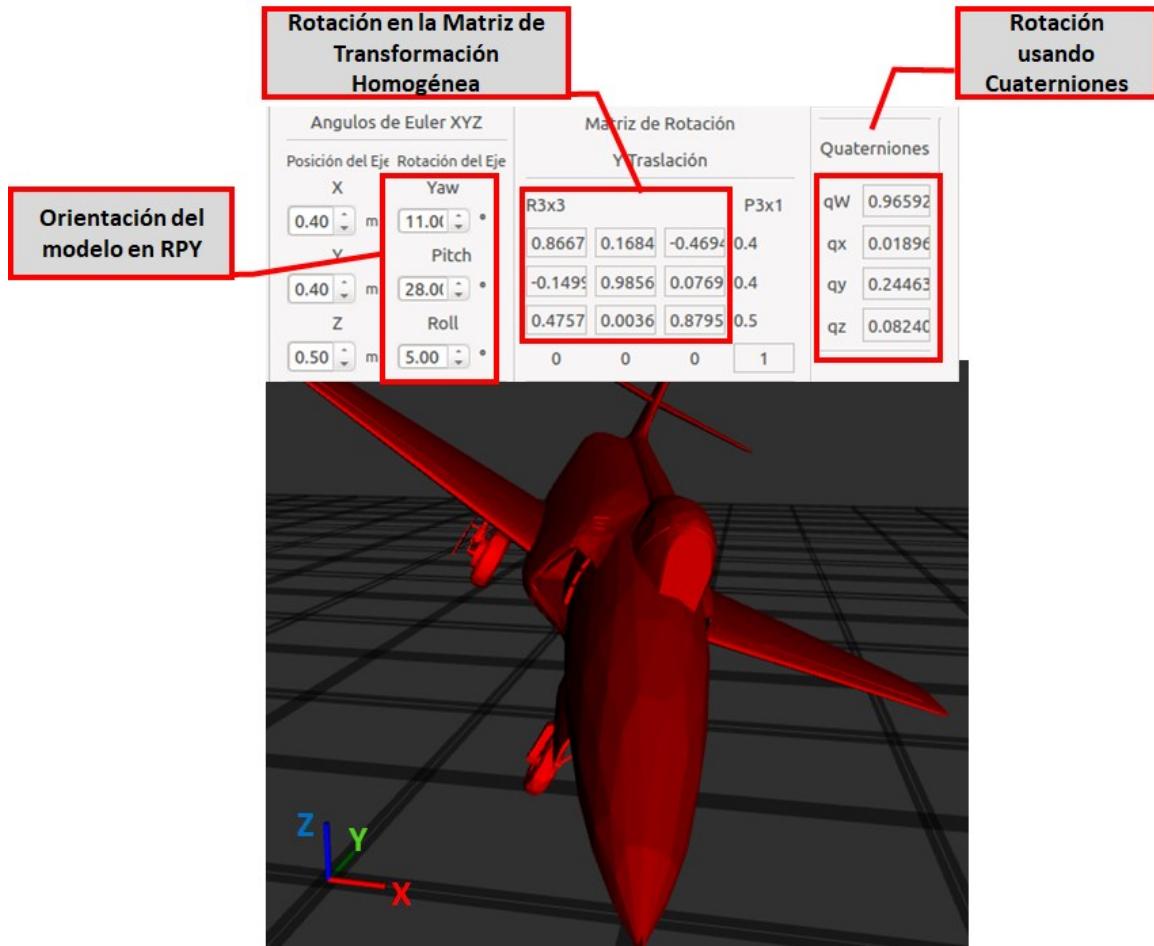


Figura 2. 66: Rotación del Modelo en 3D del Avión

En la Figura 2.66 se muestra el modelo del Avión Aplicando los ángulos de Euler y representando los datos respectivos con la matriz de transformación homogénea y Cuaternios.

Con esta aplicación se abarca los fundamentos de matemática del Robot indispensables para el estudiante de robótica al aplicar la traslación y orientación de un objeto en un ambiente 3D.

#### 2.3.3.2.4 Comprobación de Cinemática Directa

Se implementa la librería KDL para encontrar la cinemática directa del modelo cargado a la interfaz desde un archivo URDF, Para esto se ejecuta un parser del archivo URDF definiéndole a la librería KDL los límites de la cadena cinemática a analizar para todos los modelos se usan *base\_link* y *Tool0*, se obtiene un objeto

de la clase KDL\_Chain del cual se obtiene un objeto con la solución de la cinemática y por último se somete este objeto anterior a diferentes vectores de ángulos para obtener la posición de la herramienta con la función *JntToCart* (Joints a Coordenadas cartesianas). (Ver figura 2.67)

```

nh_.deleteParam("root_link");
nh_.deleteParam("tip_link");
nh_.setParam("root_link","base_link");
nh_.setParam("tip_link","tool0");

/// Get KDL TREE
if (!kdl_parser::treeFromUrdfModel(urdf_model, kdl_tree)){
    ROS_ERROR("Failed to construct kdl tree");
    nh.shutdown();
}

/// GET KDL CHAIN
if(!kdl_tree.getChain("root_link", "tip_link", kdl_chain6))
{
    ROS_ERROR("Error getting KDL chain");
    nh.shutdown();
}

fksolver6= new KDL::ChainFkSolverPos_recursive(kdl_chain6);

double roll = 0.0 , pitch = 0.0 , yaw = 0.0;
fksolver6->JntToCart(q6, result6,njnt);

```

Parámetros base\_link y Tool0 de la cadena Cinemática

Puntero Con archivo URDF en C++

Objeto con Solución de Cinemática del robot

objeto con la Cadena Cinemática

Datos de la Cinemática Directa

Figura 2.67: Obtención de los datos de Cinemática directa con KDL.

Como se puede observar en la Figura 2.68 se ingresan los ángulos de cada Joint para un modelo MH5 de Motoman del cual nos interesa conocer la posición final de la Herramienta con las coordenadas XYZ y los ángulos de Euler RPY.

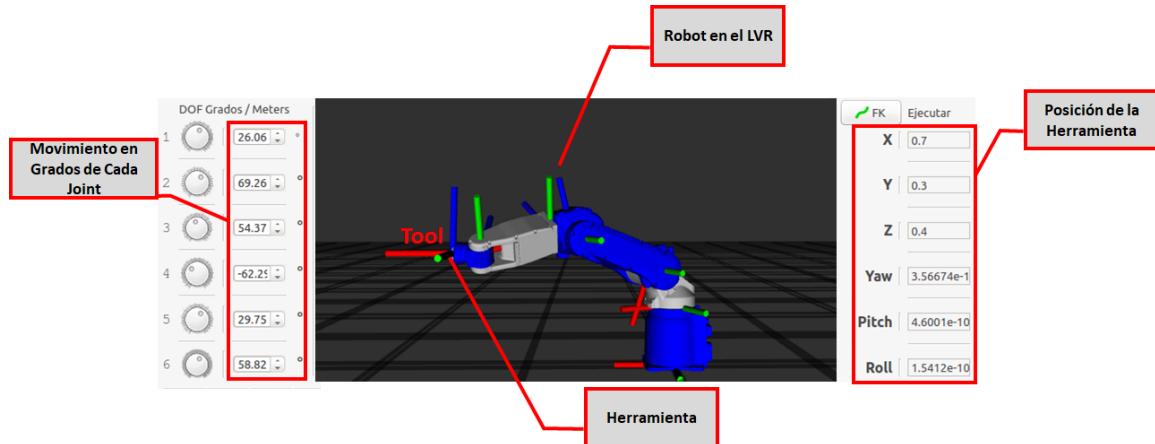


Figura 2.68: Visualización del robot y su cinemática directa respectiva.

### 2.3.3.2.5 Comprobación de Cinemática Inversa.

En la Cinemática Inversa igual se utiliza la librería KDL para obtener los datos de los ángulos del robot dada una posición en coordenadas XYZ, se sigue el mismo algoritmo de la Cinemática Directa, solo que para este se usa otra clase que

describa la Cinemática inversa usando el modelo matemático de Newton - Raphson Como se plantea en la Sección 2.1.4 Librería Orocó, el cual es una optimización nolineal, basado en funciones de algoritmos. Para ejecutar este proceso de software con KDL, es necesario pasarle como argumento la cadena cinemática en cuestión, El Solver del algoritmo de la Cinemática Directa y un Solver de la Cinemática Inversa en velocidad para ser utilizado en el método de Newton-Raphson de KDL. (Ver figura 2.69)



Figura 2.69: Obtención de los datos de Cinemática inversa con KDL.

De tal forma en la Figura 2.70 se ingresan las posiciones en XYZ y ángulos RPY que queremos situar la herramienta para un modelo MH5 de Motoman del cual nos interesa conocer la posición final de los ángulos de cada Joint el robot.

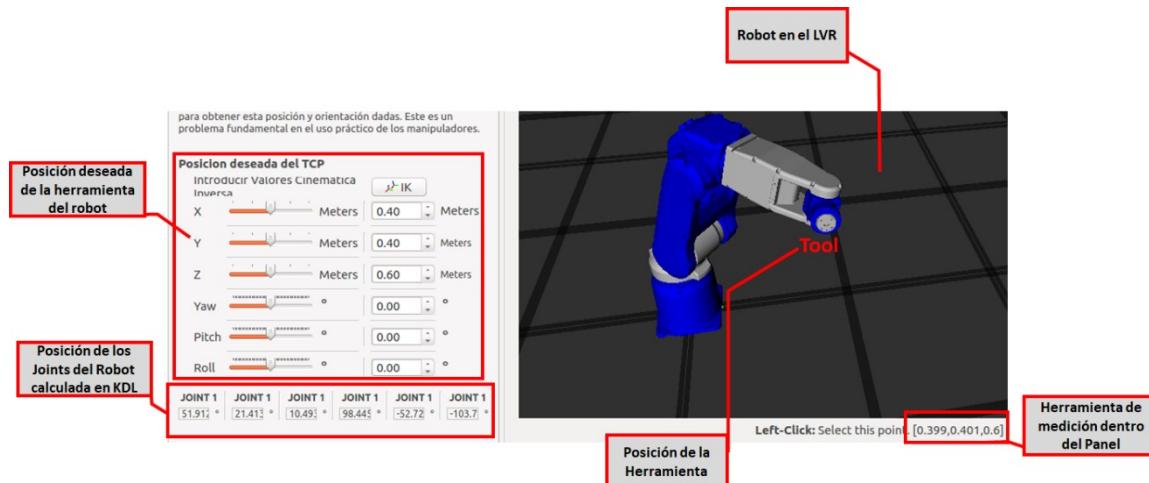


Figura 2.70: Visualización del robot y su cinemática inversa respectiva.

Todos los modelos proveídos por el LVR pueden ser analizados usando la cinemática directa en inversa, obteniendo de esta forma una interfaz transparente para el estudio de las diferentes morfologías de cada Robot.

### 2.3.3.2.6 Algoritmo de Denavit Hartenberg

El uso de este algoritmo es importante dentro de los fundamentos de la robótica, como se describe en la sección 2.2.4.2 Denavit - Hartenberg (DH), donde requerimos encontrar los parámetros que describan el modelo del robot ya que estos mismos nos sirven para visualizar el robot dentro de la subinterfaz del LVR, usando la librería KDL asociamos los datos ingresados por el usuario vía widgets, como podemos apreciar en la Figura 2.71 y apreciar el modelo en la Figura 2.72.

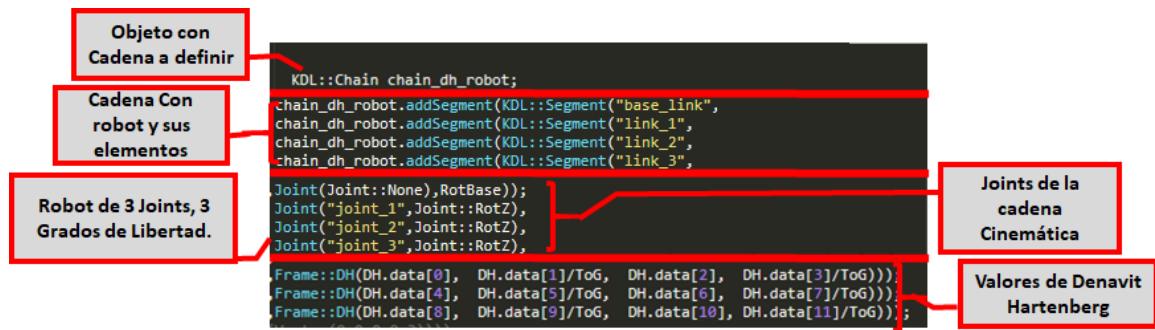


Figura 2.71 Programación en C++ con ingreso de datos de Denavit – Hartenberg

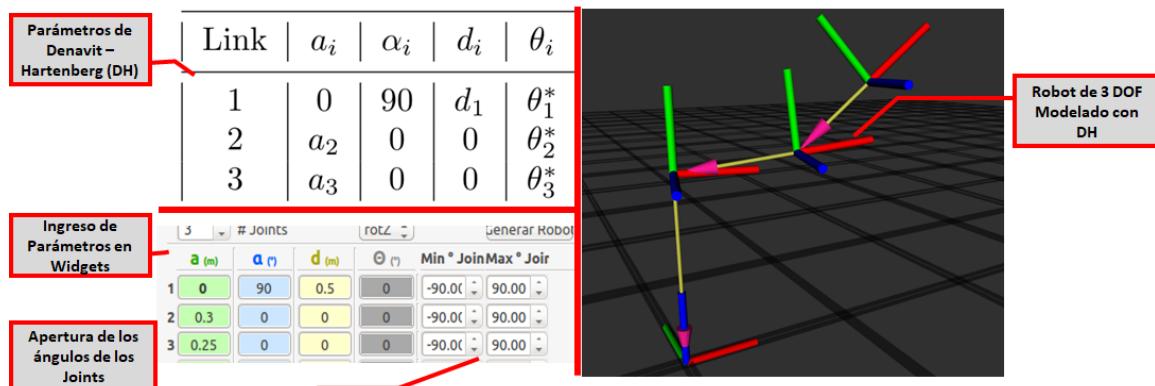


Figura 2.72 Modelos de Robot Generado con DH.

La subinterfaz del LVR puede modelar robots de hasta 6 grados de libertad como Máximo usando los parámetros de Denavit – Hartenberg, lo cual cumple con los fundamentos de robótica que indica que un robot de más de 6 grados de libertad se vuelve redundante y no óptimo. En la Figura 2.73 se muestra el robot IRB 120 de ABB de 6 grados de libertad modelado con DH.

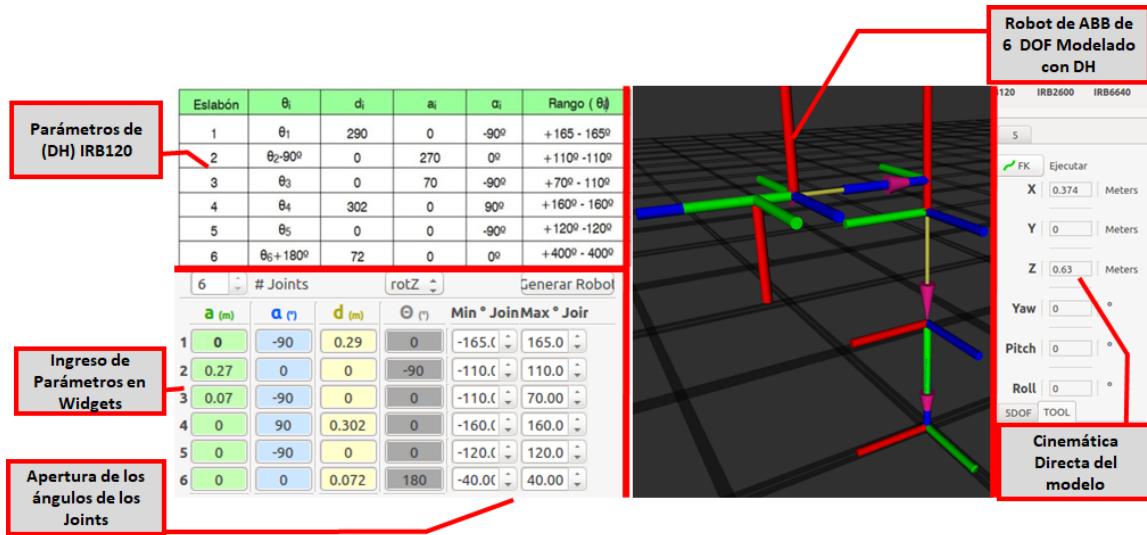


Figura 2.73: Modelo de robot ABB IRB 120 con DH.

### 2.3.3.2.7 Gráficos de los movimientos de Joints.

Como ultima funcionalidad la interfaz de matemática y cinemática posee la capacidad de visualizar los movimientos de cada Joint del modelo a estudiar para esto se usó la librería QCustomplot (Ver sección 2.1.7) como graficador. En la Figura 2.74 se observa

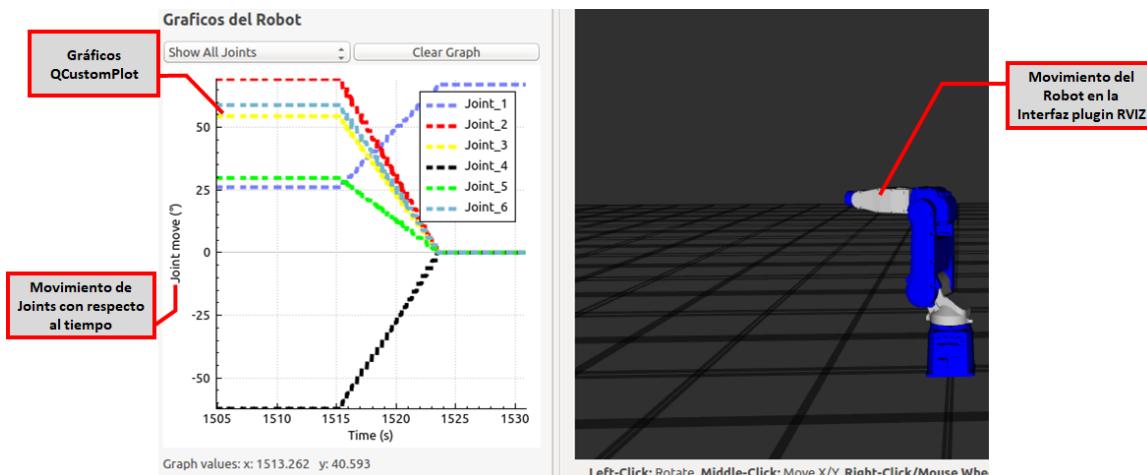
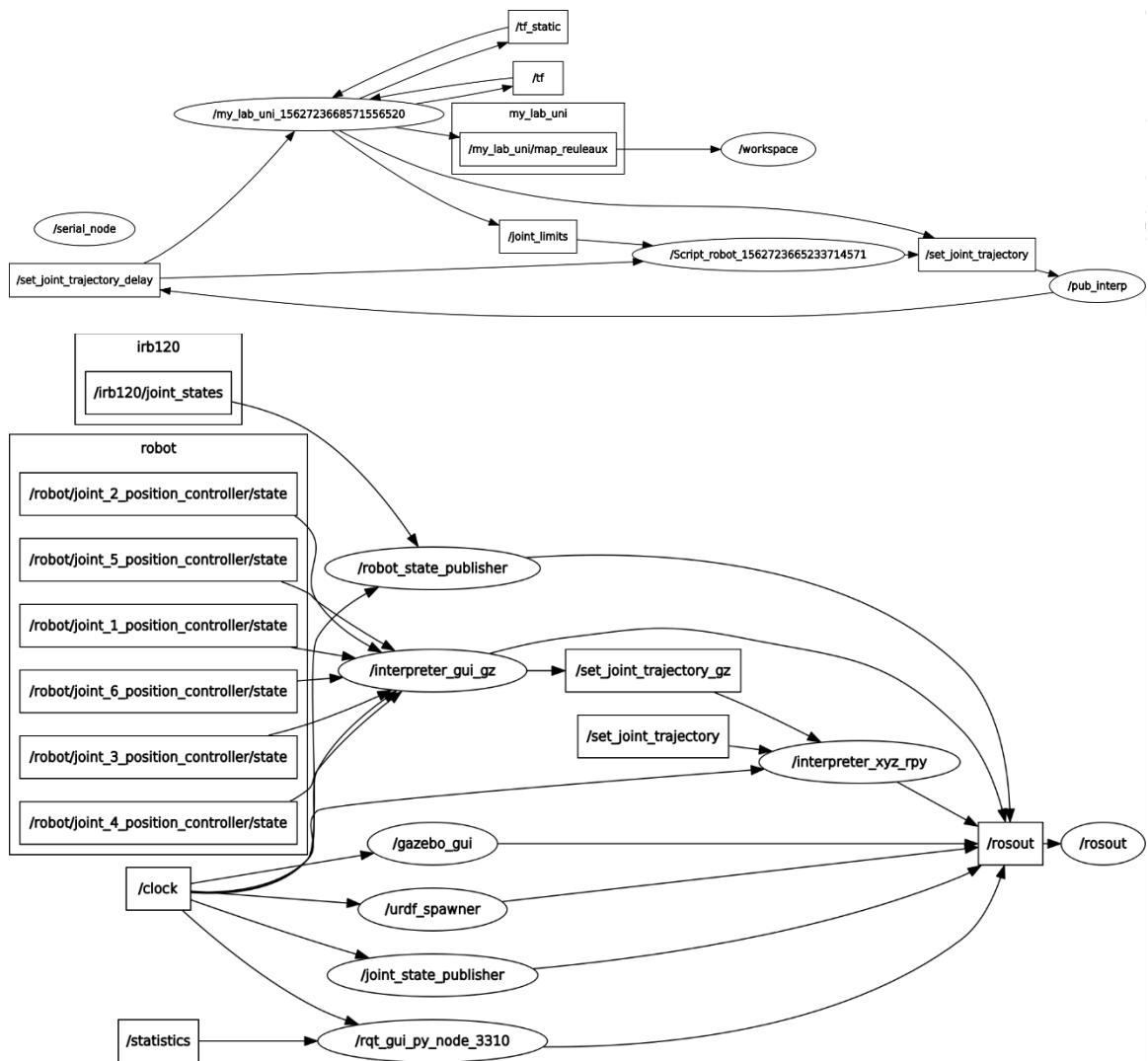
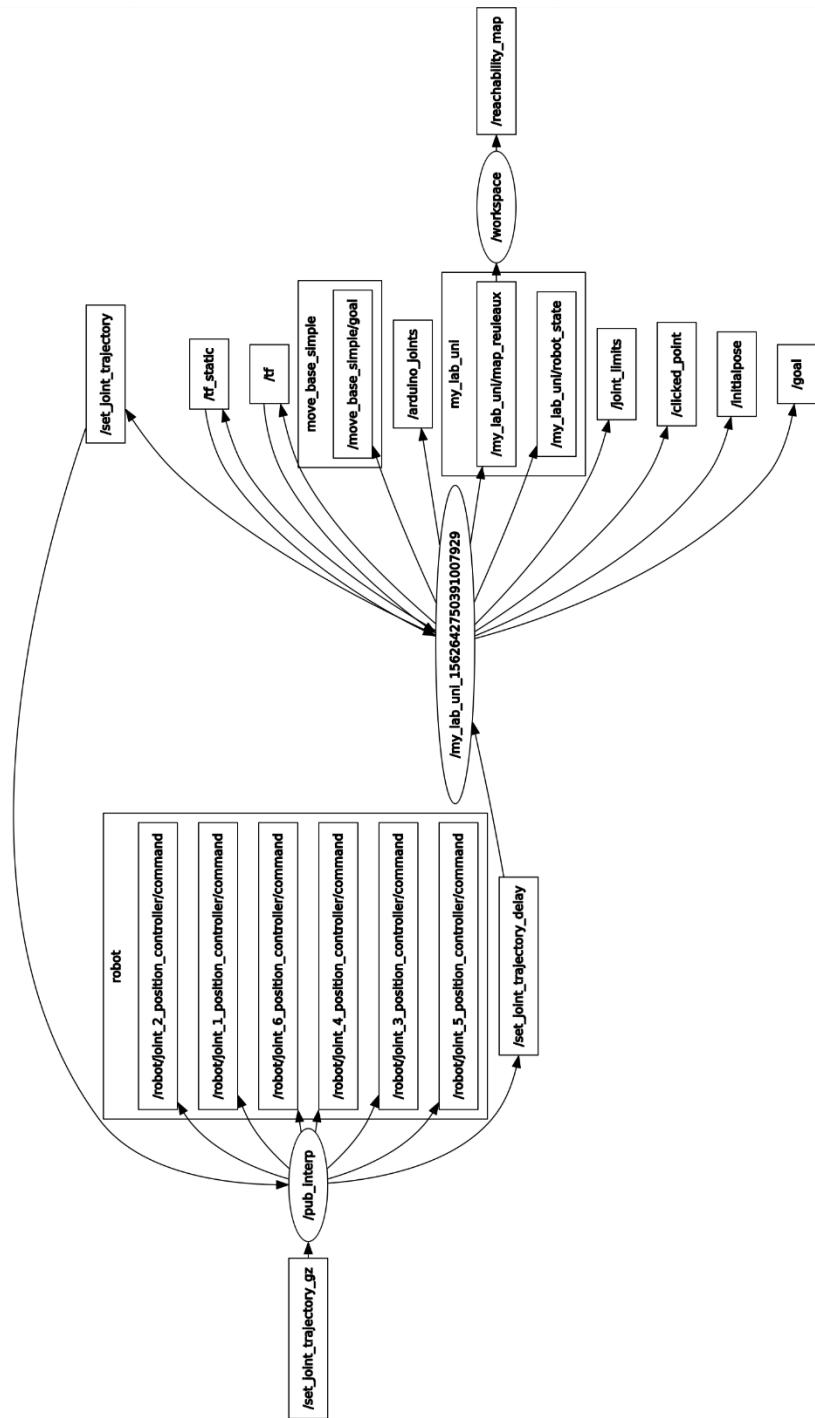


Figura 2.74: Gráficos del movimiento del robot.





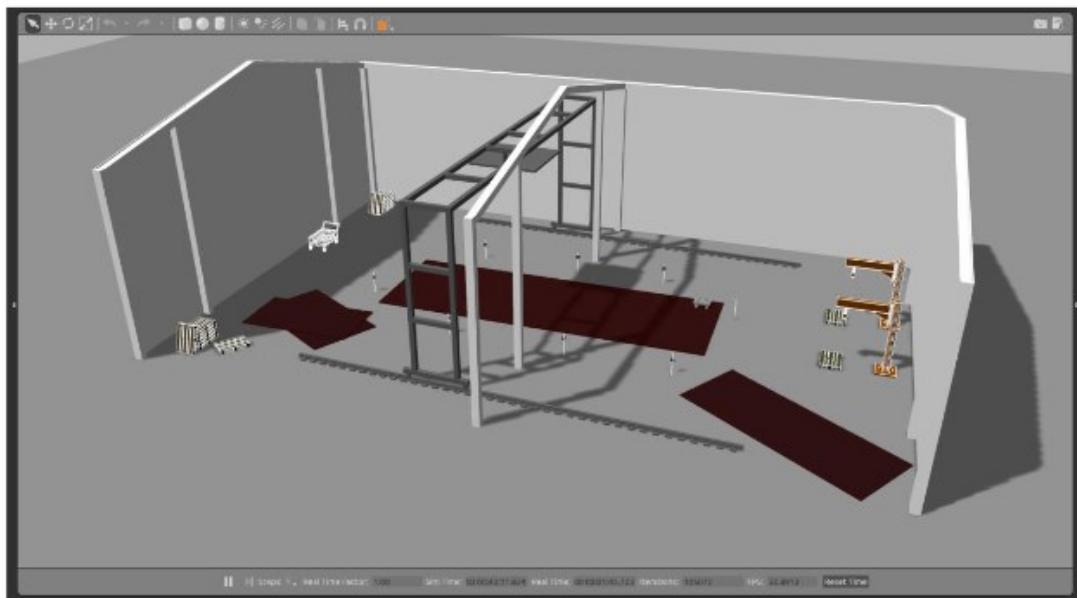
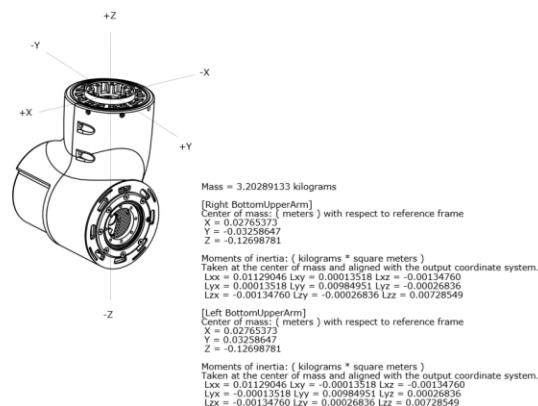
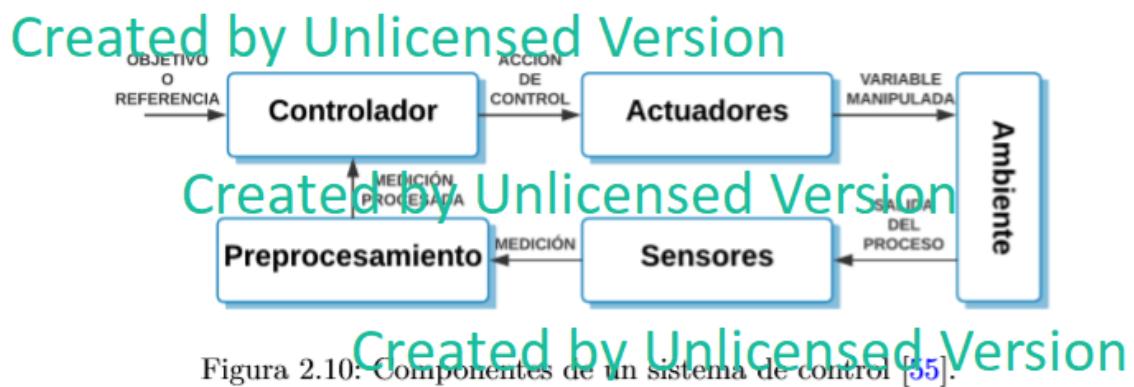
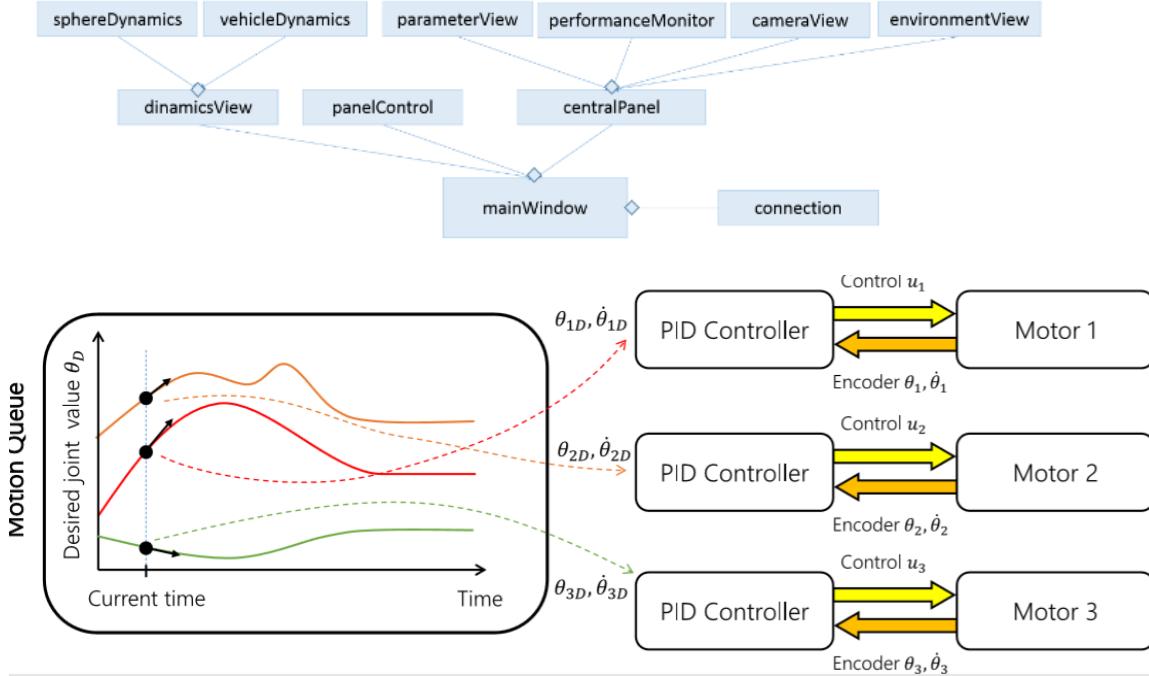


Figura 21. Interfaz de Gazebo mostrando el entorno que emula la industria desarrollado.





	PR2	UR5	Valkyrie arm	Valkyrie foot	iiwa
BioIK 2	100.00%	99.93%	99.93%	100.00%	99.93%
BioIK 1	75.69%	51.20%	29.13%	70.14%	66.84%
TRAC_IK	99.91%	99.29%	99.64%	99.98%	99.88%
KDL	53.10%	41.70%	41.13%	91.68%	51.62%

Table 4.1: FK/IK benchmark: success rate

### Interfaz Modelacion de los robots

El plugin de RViz robot\_model ejecuta un parser (Lectura de análisis secuencial) del archivo URDF

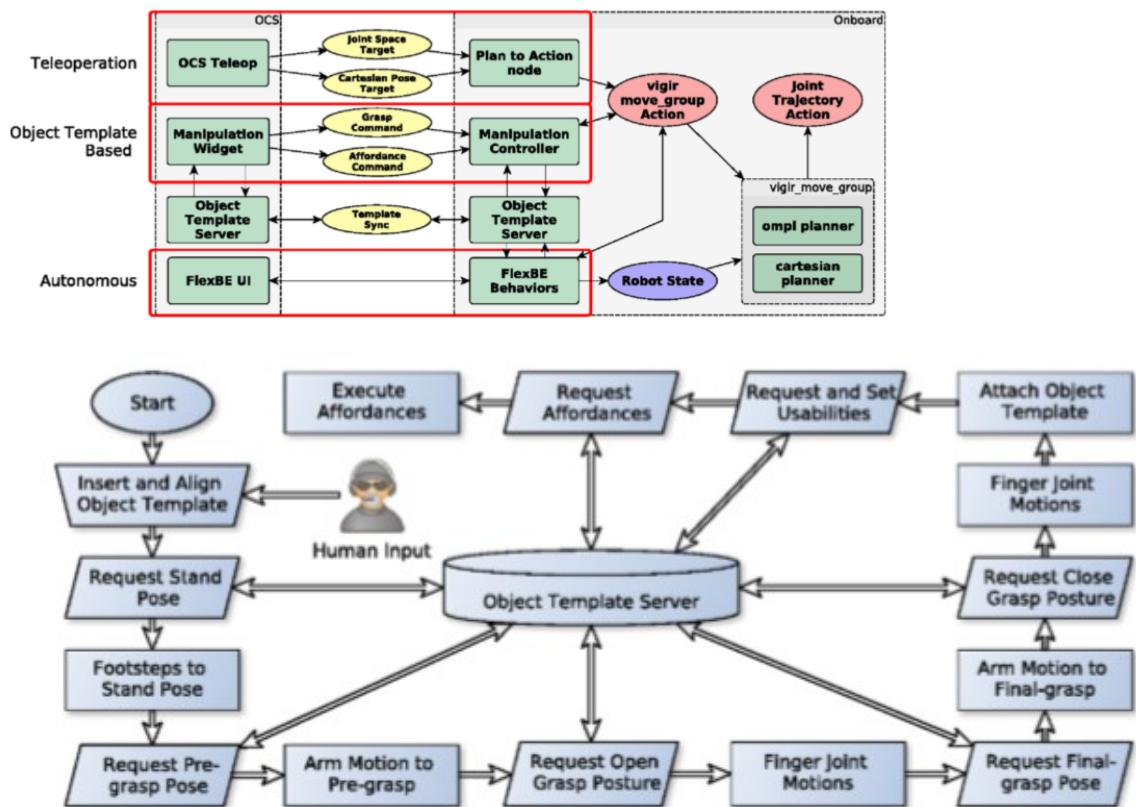
La Celda de Trabajo esta bajo Gazebo simulator, en este se puede incluir cualquier escenario diseñado en herramientas CAD, agregando los modelos a la carpeta de Gazebo

```
$ cd ./gazebo/models
```

### Otros recursos más allá de los básicos

Se mencionó que en un laboratorio real la principal actividad es la programación del robot, para lo cual se utiliza el lenguaje del fabricante. En el laboratorio virtual se decidió incorporar otros recursos que le permitan al estudiante realizar otro tipo de actividad. Por ejemplo, el laboratorio cuenta con xxxx, lo cual permite al estudiantes visualizar el espacio de trabajo para el robot bajo estudio.

### Cinematica de



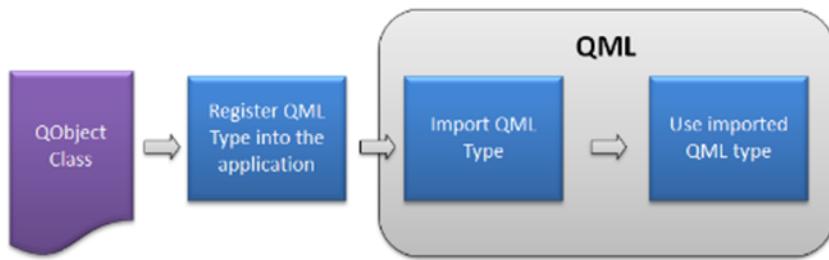


Figure 5.5: Registering QML Type

En la actualidad se dispone de un sinnúmero de herramientas que pueden utilizarse para modelar un robot. En el mundo académico una de las herramientas es utilizadas es MATLAB, principalmente cuando el modelo es utilizado para la investigación en el campo de la robótica. Se pueden herramientas CAD, tal como SOLIDWORK, para la modelación del robot. (**¿que ventajas tiene por ejemplo con respecto a AUTOCAD y MATLAB?**).

Tema	Publicador	Suscriptor
battery/state	exo_battery	exo_btTx
emg_intention	exo_intention_emg	exo_intention
eeg_intention	exo_intention_eeg	exo_intention
intention_test	exo_test_ui	exo_intention
movefinished	Actuadores como l_hip_actuator, l_knee_actuator y l_ankle_actuator	exo_intention

**Tabel 1.** Funktsioonid, mille peab implementeerima TeMotoga kasutatav keskkonnamudeli haldustarkvara liides.

Funktsiooni signatuur	Funktsiooni kirjeldus
ObjectContainer <b>getObject(string name);</b>	Tagastab andmebaasist nime põhjal esemekirje. (Nõue 3)
MapContainer <b>getMap(string name);</b>	Tagastab andmebaasist nime põhjal kaardikirje. (Nõue 3)
ComponentContainer <b>getComponent(string name);</b>	Tagastab andmebaasist nime põhjal komponendikirje. (Nõue 3)
RobotContainer <b>getRobot(string name);</b>	Tagastab andmebaasist nime põhjal robotikirje. (Nõue 3)
<b>string getTypeByName(string name);</b>	Tagastab kirje nime põhjal vastava kirje tüübi.
MapContainer <b>getNearestParentMap(string name);</b>	Tagastab ruumi, kus vastava nimega kirje asub.

Como se mencionó el laboratorio virtual incorpora modelos de robots de fabricantes tales como ABB, KUKA, etc. y por tal razón se utilizan los modelos suministrados por los fabricantes. ([ventajas..](#)) Dichos modelos son creados utilizando el formato de descripción de robot unificado (URDF, por sus siglas en inglés) lo cual facilita.....

**¿Qué papel juega ROS en la implementación?**

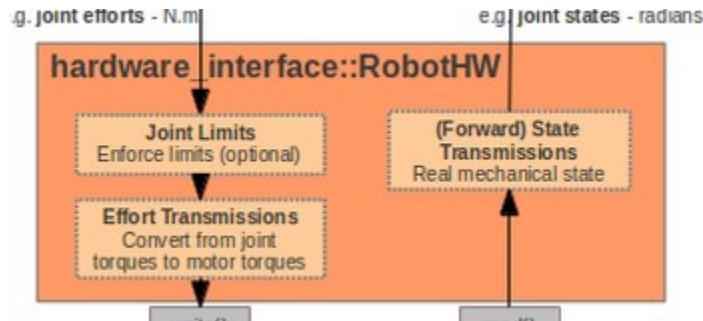
**Programación de los robots**

**Documentación**

**Celda de trabajo**

## Otros recursos

### Interfaz gráfica de usuario



Como el world de gazebo toma el hardware interface par el control de PID

- ✗ **RVIZ** es utilizado en el desarrollo del laboratorio virtual principalmente para visualizar la morfología y estudiar la cinemática de los robots.
- ✗ En el laboratorio virtual de robótica RQT se utilizó para graficar la estructura de datos correspondiente a la posición del robot durante su movimiento.
- ✗ el documento se presentarán las características de GAZEBO dado que es el simulador que se incorporo en el LVR en la practicas de programación del robot.
- ✗ De igual forma, **cuenta** con las herramientas y la guía para desarrollar sus modelos propios.
- ✗ La GUI está diseñada de tal forma que el estudiante podrá usar los recursos de manera transparente sin necesidad de tener que configurar aspectos básicos de ROS tales como su inicialización y el lanzamiento de nodos.

## **CAPÍTULO III: ANÁLISIS DE RESULTADOS**

---

Qué experimentos podemos realizar para demostrar que los recursos del LVR permiten realizar, efectiva y eficientemente, ¿actividades relacionadas con los fundamentos de la robótica industrial?

¿Cuántos experimentos serían suficiente?

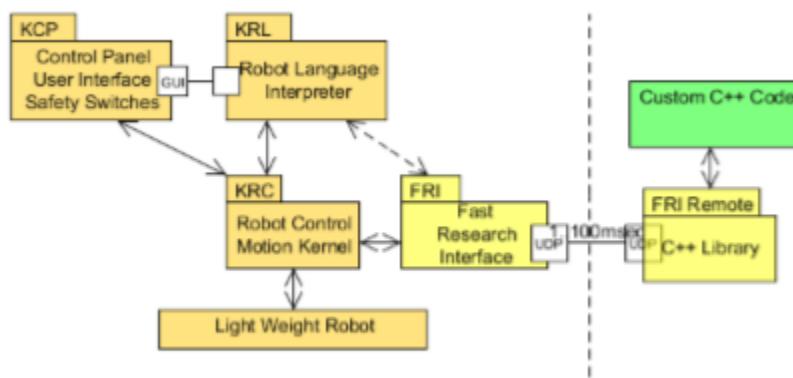
¿Cuáles serían los temas apropiados?

## CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

---

### CONCLUSIONES

A continuación, son presentadas conclusiones sobre los objetivos específicos establecidos para lograr el objetivo general.



**Figure 2:** Overview of the FRI control system architecture.

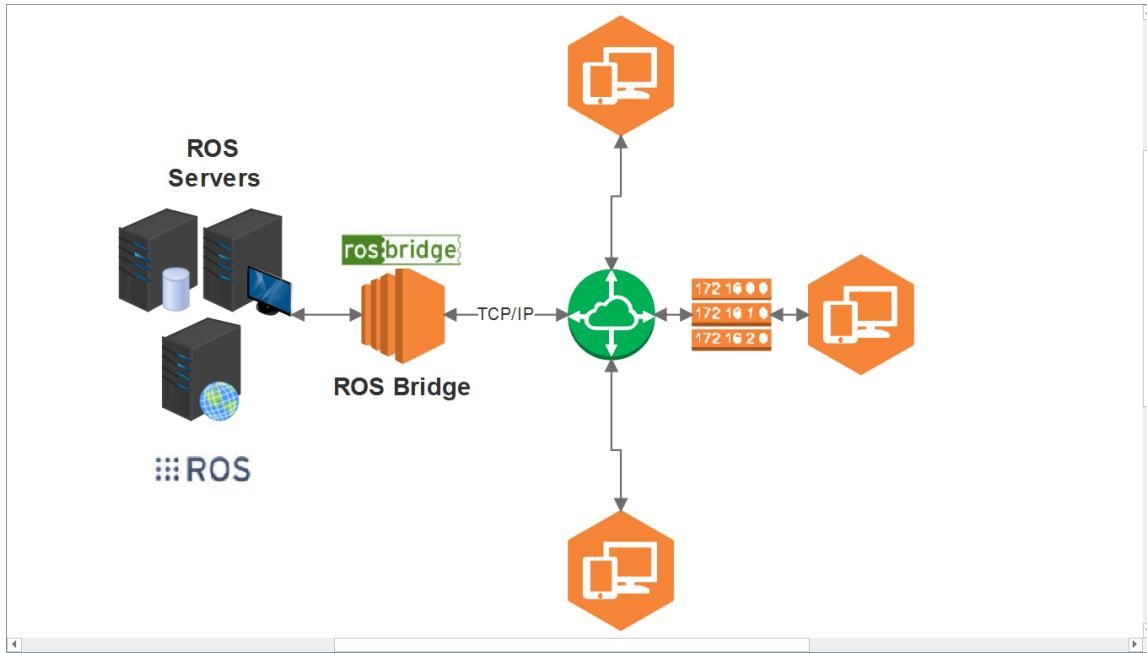
Robot Kuka y ROS Uso en sistemas industriales con el lenguaje KRL

- .
- .
- .
- .
- .
- .
- .
- .

### RECOMENDACIONES

A continuación, se presentan algunas recomendaciones que pueden contribuir a mejorar las prestaciones del prototipo desarrollado en este proyecto.

• .  
• .  
• .



## Bibliografía

- Barrientos, A., Peñín, L. F., Balaguer, C., Aracil, R. (2007). Fundamentos de robótica. Madrid, España. McGraw-Hill/Interamericana de España, S. A. U.
- Craig, J. J. (2006). Róbotica, Mexico. Pearson Educación de México,S.A.de C.V.
- Jara, C., et al. (2011). Hands-on experiences of undergraduate students in Automatics and Robotics using a virtual and remote laboratory. *Computers & Education*, 57(4), 2451–2461. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2011.07.003>
- Candelas, F., Torres, F., Gil, P., Ortiz, F., Puente, S., & Pomares, J. (2004). Laboratorio virtual remoto para robótica y evaluación de su impacto en la docencia. *RIAI: Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 1(2), 49–57. Obtenido de <http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/4609>
- Castellanos, F., & Martínez, O. (2010). Laboratorios virtuales (LV) como apoyo a las practicas a distancia y presenciales en Ingeniería. *INGE CUC*, 6(1), 267-280. Obtenido de <http://revistascientificas.cuc.edu.co/index.php/ingecuc/article/view/311>
- Ortega, J., Sánchez, R., González, J., & Reyes, G. (2016). Virtual laboratories for training in industrial robotics. *IEEE Latin America Transactions*, 14(2), 665-672. doi 10.1109/TLA.2016.7437208

Makhal, A., & Goins, A. K. (2018, January). Reuleaux: Robot base placement by reachability analysis. En 2018 Second IEEE International Conference on Robotic Computing (IRC) (pp. 137-142).

CNU (2018, abril) Repositorios Nicaragua. En Wellcome to the university repository of the CNU Obtenido de <http://repositorio.cnu.edu.ni/>

Ramírez, K. (2018, abril) Material del Curso CI-2657. En Lista de Presentaciones Obtenido de <http://www.kramirez.net/ci-2657/materialci2657/>

COSTARICAMAKERS. (2018, abril) Tag Archives: ROS: YA CONTAMOS PERSONAS... AHORA HAGAMOS ALGO CON PYTHON Obtenido de <http://costaricamakers.com/?tag=ros>

Valverde, S. (2015). "Robótica inteligente: Implementación de sensores 3D para desenvolvimiento de robots móviles y vehículos autónomos" Obtenido de [https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/6932/robotica\\_inteligente\\_implementaci%C3%B3n\\_sensores\\_desenvolvimiento.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/6932/robotica_inteligente_implementaci%C3%B3n_sensores_desenvolvimiento.pdf?sequence=1&isAllowed=y).

Rosas, L., Fuentes, M., Samaniego, C., Alvarado, R., & Valencia, J. (2013). MODELADO Y CONTROL DEL ROBOT MÓVIL ROBOTNIK SUMMIT XL. Obtenido de <http://cerescontrols.com/wp-content/uploads/2013/10/SUMMIT-XL-Informe-Final.pdf>

Justina (2017, mayo) Justina. En user\_manual Obtenido de [https://github.com/RobotJustina/JUSTINA/blob/master/user\\_manual/user\\_manual.pdf](https://github.com/RobotJustina/JUSTINA/blob/master/user_manual/user_manual.pdf)

Eagle X (2018, marzo) Un robot construido por alumnos del TEC. En Vinculación y prestigio Obtenido de <https://tec.mx/es/noticias/queretaro/vinculacion-y-prestigio/un-robot-construido-por-alumnos-del-tec>

Juárez, G. (2008) IMPLEMENTACIÓN DE UN LABORATORIO VIRTUAL CON LA AYUDA DE LABVIEW, AL CURSO DE CIRCUITOS ELÉCTRICOS 1. Obtenido de [http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08\\_0148\\_ME.pdf](http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0148_ME.pdf)

Prieto, R., Zaldivar, U., & Bernal, R. (2010) Creación de un Laboratorio Virtual para Optimizar el uso de un Laboratorio de Robótica Real. Obtenido de [https://www.academia.edu/374898/Creaci%C3%B3n\\_de\\_un\\_Laboratorio\\_Virtual\\_para\\_Optimizar\\_el\\_uso\\_de\\_un\\_Laboratorio\\_de\\_Rob%C3%BCtica\\_Real](https://www.academia.edu/374898/Creaci%C3%B3n_de_un_Laboratorio_Virtual_para_Optimizar_el_uso_de_un_Laboratorio_de_Rob%C3%BCtica_Real)

Ayala, J., Pupo, L., & Salazar, L. (2016) LABORATORIO VIRTUAL DE INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL Obtenido de <http://www.informaticahabana.cu/sites/default/files/ponencias/EDU095.pdf>

Owen, A. (14 de marzo de 2016). What is the Best Programming Language for Robotics? [Entrada en un blog] Robotiq. Recuperado de <https://blog.robotiq.com/what-is-the-best-programming-language-for-robotics>

Tellez, R. (2017). A thousand robots for each student: Using cloud robot simulations to teach robotics. En *Robotics in Education*, 143-155. Springer, Cham.

MoveIt! (s. f.) Concepts. En Documentacion Obtenido de <http://moveit.ros.org/documentation/concepts/>

Corke, P. I. (1996). A robotics toolbox for MATLAB. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 3(1), 24-32. doi 10.1109/100.486658

ROS (s. f.) Core components. En Communications Infrastructure Obtenido de <http://www.ros.org/core-components/>

Charles River Analytics Inc (2018). [fotografía]. robot\_localization Recuperado de <https://www.cra.com/work/case-studies/robotlocalization>

Orococos\_kdl Class Reference (2019). ChainIkSolverPos\_NR\_JL Recuperado de [http://docs.ros.org/indigo/api/orococos\\_kdl/html/classKDL\\_1\\_1ChainIkSolverPos\\_NR\\_JL.html](http://docs.ros.org/indigo/api/orococos_kdl/html/classKDL_1_1ChainIkSolverPos_NR_JL.html)

OpenRAVE (2019). IKFast Recuperado de <http://openrave.org/docs/0.8.2/openravepy/ikfast/>

Pitzer, B., Osentoski, S., Jay, G., Crick, C., & Jenkins, O. C. (2012, May). Pr2 remote lab: An environment for remote development and experimentation. In *Robotics and Automation (ICRA), 2012 IEEE International Conference on* 3200-3205. IEEE.

Casañ, G. A., Cervera, E., Moughlbay, A. A., Alemany, J., & Martinet, P. (2015). *ROS-based online robot programming for remote education and training*. In *Robotics and Automation (ICRA), 2015 IEEE International Conference on* 6101-6106.

Universidad Tecnológica La Salle (2017) Ingeniería en Mecatrónica y Sistemas de Control. En Plan de estudio Obtenido de <http://www.ulsa.edu.ni/index.php/ingenieria-en-mecatronica-y-sistemas-de-control>

Calvo, I., Zulueta, E., Gangoiti, U., López, J. M., Cartwright, H., & Valentine, K. (2009). *Laboratorios remotos y virtuales en enseñanzas técnicas y científicas* (Vol. 3, No. 3, pp. 1-21). Ikastorratza.

Pérez, X., Cerdá, A., & Incer, W. (2016) Desarrollar un laboratorio virtual para la realización de prácticas de laboratorio en la disciplina de control automático y automatización industrial

ROS Industrial (2016, noviembre) ROS QTC Plugin. En Repositorio Obtenido de [https://github.com/ros-industrial/ros\\_qtc\\_plugin](https://github.com/ros-industrial/ros_qtc_plugin)

ROS-Industrial (2017, Marzo) En ROS-Industrial Obtenido de <http://wiki.ros.org/Industrial/Tutorials>

Willow Garage. (2010, Abril) En Comic: Reinventing the Wheel [Entrada en un blog] Obtenido de <http://www.willowgarage.com/blog/2010/04/27/reinventing-wheel>

Merino, E. (2015) DISEÑO DE UN SIMULADOR DE COMPILADOR PARA PLATAFORMA MOODLE E IMPLEMENTACIÓN DE UN LABORATORIO VIRTUAL PARA LA ENSEÑANZA DE PROGRAMACIÓN.

Guerrero, L., Gómez, D., Sandoval, E., Thomson, P., Marulanda, J. (2014). SISMILAB, UN LABORATORIO VIRTUAL DE INGENIERÍA SÍSMICA, Y SU IMPACTO EN LA EDUCACIÓN.

ROBOTIS Co., Ltd. (2017). [fotografía]. *ROS Robot Programming*. Obtenido de <https://community.robotsource.org/t/download-the-ros-robot-programming-book-for-free/51>

QT Wiki (2019). [fotografía]. Qt Widget Gallery Recuperado de <https://doc.qt.io/qt-5/gallery.html>

# **ANEXOS**

## A: Instalación de Recursos de Software para el Laboratorio Virtual.

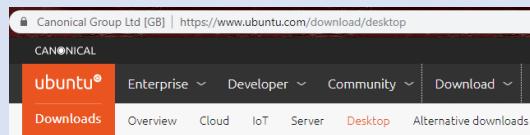
La instalación de todos los recursos de software expuestos fue utilizando una laptop Intel Core I3 con 8GB de RAM y 120 GB de espacio libre de almacenamiento en el disco duro.

### A.1 Instalación de UBUNTU 16.04 Xenial

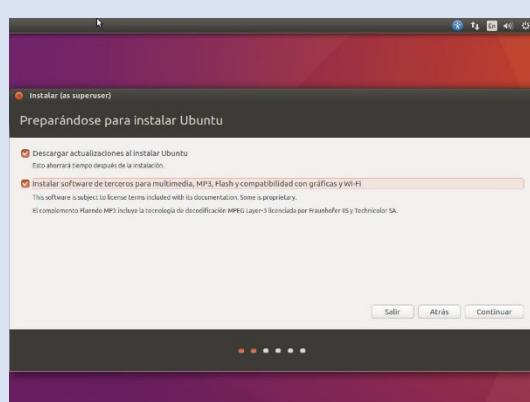
La tabla A.1 detalla el proceso de instalación:

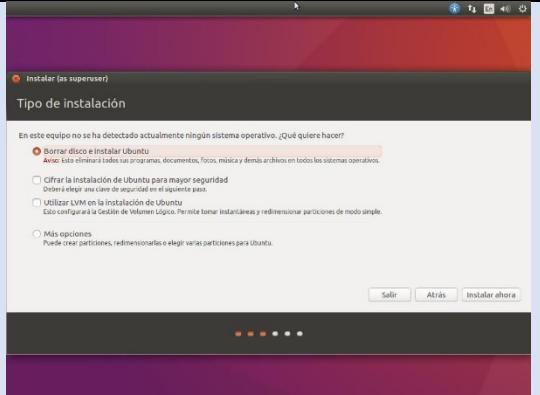
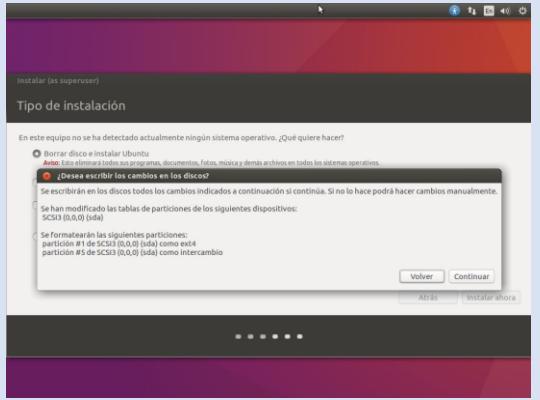
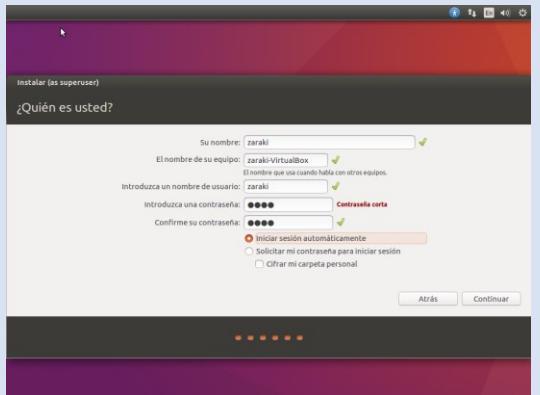
Tabla A.1: Instalación de UBUNTU 16.04 Xenial

Requisitos Preliminares	
Paso 0	<ul style="list-style-type: none"><li>✓ Disponer de al menos 10 GB de espacio de almacenamiento libre.</li><li>✓ Tener acceso a un DVD o una unidad flash USB que contenga la versión de Ubuntu 16.04</li><li>✓ Descargar ISO ingresando al siguiente link: <a href="https://www.ubuntu.com/download/desktop">https://www.ubuntu.com/download/desktop</a></li></ul>
Paso 1	<p><b>Arranque desde una unidad flash USB</b></p> <p>Configurar la BIOS de la computadora para que se inicie automáticamente desde USB. Basta con insertar la unidad flash USB y encender el ordenador o reiniciarlo. Aparecerá la ventana de bienvenida, solicitando que elija el idioma e instale o pruebe Ubuntu.</p>
Paso 2	<p><b>Preparado para instalar Ubuntu</b></p> <p>Después de elegir instalar Ubuntu desde la ventana de bienvenida, se le preguntará sobre las actualizaciones y el software de terceros.</p> <p>Se aconseja activar la descarga de las actualizaciones y la instalación de software de terceros</p>



Download Ubuntu Desktop



	<b>Asignar Espacio</b>	
Paso 3	<p>Utilizar las casillas de verificación para elegir si desea instalar Ubuntu junto con otro sistema operativo.</p> <p>Se aconseja disponer de un espacio de almacenamiento mayor a 10GB esto por las herramientas de visualización de ROS que luego serán instaladas como Gazebo.</p>	
Paso 4	<b>Inicio de Instalación de Ubuntu en la Unidad de Disco Asignada.</b>	
Paso 5	<b>Detalles de registro.</b>	
Paso 6	<b>Instalación Completa.</b>	

## A.2 Instalación de ROS Kinetic

La tabla A.2 detalla el proceso de instalación:

Tabla A.2: Instalación de ROS Kinetic

<b>Permitir todas las Fuentes de ROS</b>	
Paso 1	El paquete ROS no está soportado oficialmente en el conjunto de paquetes de UBUNTU para eso es necesario instalarlo desde un link externo, Se habilita el computador a que acepte paquetes de <i>packages.ros.org</i>  \$ sudo sh -c 'echo "deb http://packages.ros.org/ros/ubuntu \$(lsb_release -cs) main" > /etc/apt/sources.list.d/ros-latest.list'
<b>Configuración del key</b>	
Paso 2	Se crea el directorio ros-latest.list para el soporte de los paquetes que conforman ROS además que ciertos repositorios necesitan de instalación de Claves de autorización o .key  \$ wget http://packages.ros.org/ros.key -O -   sudo apt-key add -
<b>Instalación general</b>	
Paso 3	Primero se debe asegurar que Ubuntu este actualizado, mediante:  \$ sudo apt-get update  Luego que la actualización se complete, se puede instalar la versión completa de Kinetic, la cual es la más recomendada, mediante  \$ sudo apt-get install ros-kinetic-desktop-full
<b>Inicialización de ROS</b>	
Paso 4	rosdep habilita la fácil instalación de dependencias en el código a compilar y además es requerido para correr algunas dependencias de los componentes de ROS, Ejecutar los comandos siguientes, uno a la vez:  \$ sudo rosdep init \$ rosdep update
<b>Configuración del entorno de trabajo de ROS para Ubuntu</b>	
Paso 5	Existen usuarios que poseen varias distribuciones de ROS con estos comandos permite inicializar con cual se trabaja. Permitiendo que las variables del entorno ROS sean automáticamente añadidas a la sesión bash cada vez que abrimos una nueva ventana Shell, Ejecutar los comandos siguientes, uno a la vez:  \$ source /opt/ros/kinetic/setup.bash \$ source ~/catkin_ws /devel/setup.sh

### A.3 Espacio de trabajo Catkin

La tabla A.3 muestra el proceso de creación de un espacio de trabajo para compilar los paquetes de ROS:

*Tabla A. 3 Creación del Espacio de Trabajo Catkin.*

Creación del Espacio de trabajo ROS	
Paso 1	El compilador necesita que se le indique la ruta de acceso a los archivos a ser compilados para esto se construye un entorno de trabajo (catkin workspace), <i>Ejecutar en una terminal</i> \$ mkdir -p ~/catkin_ws/src
Inicialización del Espacio de trabajo	
Paso 2	Con las carpetas creadas accedemos a la carpeta donde estarán almacenados los archivos fuentes de C++ a ser compilados. Ejecutamos los dos comandos uno a la vez. \$ cd ~/catkin_ws/src \$ catkin_init_workspace
Construcción del Espacio de trabajo (Building)	
Paso 3	Ya que se ha inicializado el espacio de trabajo procedemos a compilar este mismo, debido a que no hemos agregado ningún paquete a compilar este no dilatará en crear todo el directorio necesario del espacio de trabajo. \$ cd ~/catkin_ws/ \$ catkin_make
Creación de un paquete.	
Paso 4	Para la creación de un paquete nuevo utilizamos Catkin con el cual podemos hacer referencia a los recursos de software de otros paquetes necesarios para nuestros requerimientos, los paquetes más comunes son roscpp, sensor_msgs, geometry_msgs \$ catkin_create_pkg -D “Descripción del paquete” -a Yeser --rosdistro KINETIC mi_robot roscpp sensor_msgs

#### A.4 Instalación de QT – Creator.

La tabla A.4 muestra el proceso de Instalación del IDE QT – Creator.

Tabla A.4: Instalación del IDE QT- Creator.

Obtención del Instalador	
Paso 1	Ingresamos a la Pagina WEB <a href="http://www.QT57Download.com">www.QT57Download.com</a> o via comando procedemos. <i>Ejecutar en una terminal</i> \$ wget <a href="http://download.qt.io/official_releases/qt/5.7/5.7.0/qt-opensource-linux-x64-5.7.0.run">http://download.qt.io/official_releases/qt/5.7/5.7.0/qt-opensource-linux-x64-5.7.0.run</a>
Proveer Permisos al archivo.	
Paso 2	Procedemos a garantizarle los permisos al archivo descargado para la instalación. \$ chmod +x qt-opensource-linux-x64-5.7.0.run
Instalación	
Paso 3	Dentro de la instalación se abrirá una ventana en la cual se indicará si se desea una instalación completa o parcial del IDE, Preferiblemente indicarle instalación completa para no tener problemas con librerías de QT que puedan ser relevantes. \$ ./qt-opensource-linux-x64-5.7.0.run

#### A.5 Instalación del Plugin ROS para QT – Creator.

La Tabla A.5 muestra el proceso de Instalación del Plugin de ROS desarrollado por ROS – Industrial para el IDE QT – Creator.

Tabla A.5: Instalación de Plugin ROS QT.

Instalación de dependencias	
Paso 1	Instalamos via terminal las dependencias de el repositorio de Levi Armstrong para Qt versión Xenial. <i>Ejecutar en una terminal los comandos uno a la vez.</i> \$ sudo add-apt-repository ppa:levi-armstrong/qt-libraries-xenial \$ sudo add-apt-repository ppa:levi-armstrong/ppa
Instalación del Plugin	
Paso 2	Actualizamos e instalamos el plugin de ROS para la versión de Qt5.7 \$ sudo add-apt-repository ppa:levi-armstrong/qt-libraries-xenial

	<b>Configuración del sistema</b>
Paso 3	<p>Se configura el IDE de QT a reconocer las librerías de la versión de Qt 5,7, cabe destacar que esto se hace debido a que nativamente Ubuntu posee librerías Qt para ejecutar ciertos procesos. Editamos vía comando el archivo .conf de QT</p> <pre>\$ sudo gedit /usr/lib/x86_64-linux-gnu/qt-default/qtchooser/default.conf</pre> <p>Reemplazamos los parámetros:</p> <pre>/usr/lib/x86_64-linux-gnu/qt4/bin /usr/lib/x86_64-linux-gnu</pre> <p>Por:</p> <pre>/opt/qt57/bin /opt/qt57/lib</pre>
Paso 4	<b>Clonación del espacio de trabajo Recomendado para el Plugin</b>
	<p>Como se ha mencionado en la sección 2.2 de instalación de recursos es necesario el uso de un espacio de trabajo de compilación de ROS, el repositorio ros_qtc_plugin es recomendado para una buena instalación del plugin</p> <pre>\$ git clone -b master https://github.com/ros-industrial/ros_qtc_plugin.git</pre>
Paso 5	<b>Iniciación del workspace y de las librerías de ROS.</b>
	<p>Una vez descargado el repositorio procedemos a inicializar El espacio de trabajo con el cual el IDE Qt Podrá compilar vía CMake los paquetes de ROS</p> <pre>\$ cd ~/ros_qtc_plugin-devel \$ bash setup.sh -d</pre>

Con los pasos descrito en la tabla A.5 Podemos abrir el IDE Qt Creator y Inicializar el Plugin Tal como se muestra en las siguientes Imágenes.

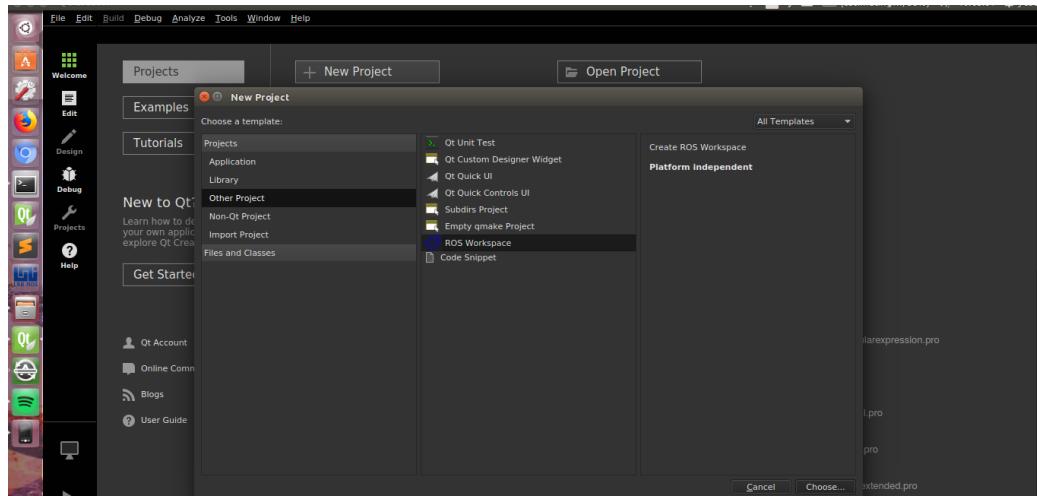


Figura A.1: IDE QT-Creator Activación del Plugin Catkin, para el espacio de Trabajo.

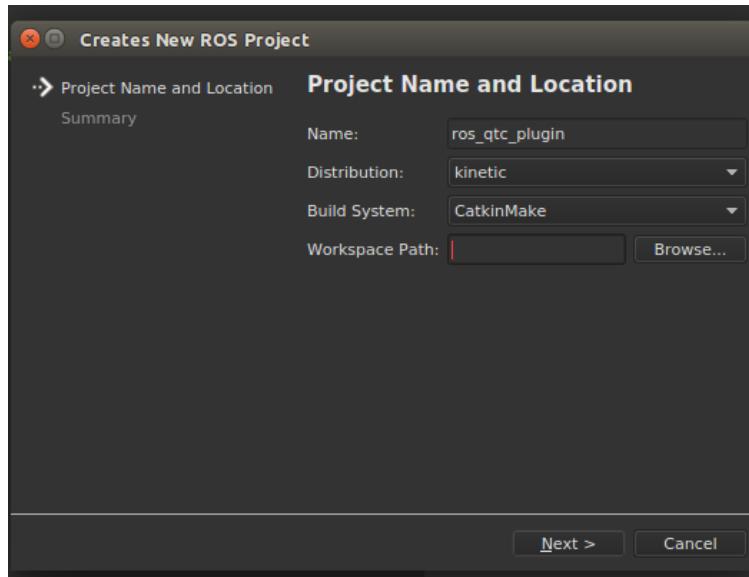


Figura A.2: Ubicación del espacio de Trabajo.

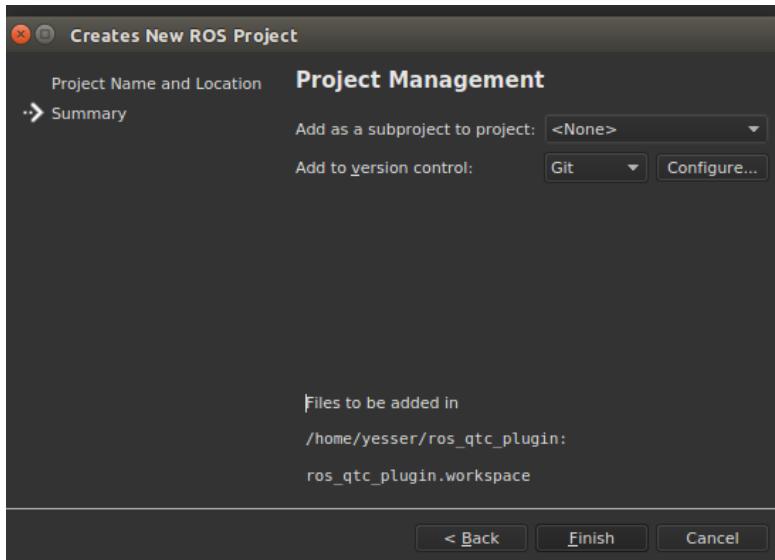


Figura A.3: Espacio de trabajo Creado.

## A.6 Instalación de Gazebo

La Tabla A.5 muestra el proceso de Instalación del Plugin de ROS desarrollado por ROS – Industrial para el IDE QT – Creator.

Tabla A.6 Instalación de Gazebo.

P	Instalación de dependencias
---	-----------------------------

	Instalamos via terminal las dependencias de el repositorio de Levi Armstrong para Qt versión Xenial. <i>Ejecutar en una terminal los comandos uno a la vez.</i>
	\$ sudo add-apt-repository ppa:levi-armstrong/qt-libraries-xenial \$ sudo add-apt-repository ppa:levi-armstrong/ppa
P	<b>Instalación del Plugin</b>