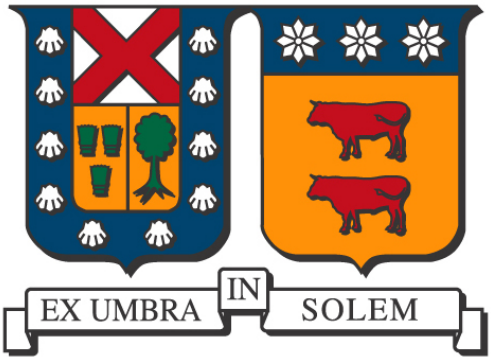
UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

VALPARAÍSO- CHILE



"PROCESO DE RECUPERACIÓN DE RODETES TIPO PELTON ASISTIDO CON BRAZO ROBÓTICO INDUSTRIAL"

DANIEL ALEJANDRO SAGREDO MARTINEZ

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE:
INGENIERO MECÁNICO INDUSTRIAL

PROFESOR GUÍA: ING. RAFAEL MENA YANSSEN

PROFESOR CORREFERENTE: FRANCISCO QUITRAL ZAPATA

NOVIEMBRE 2018

Resumen

El proceso actual de recuperación de los rodetes se realiza mediante aporte de soldadura en las zonas dañadas para luego recuperar el perfil de los capachos por medio de mecanizado abrasivo. En la actualidad esta labor es realizada de forma manual, por lo que resulta extensa y costosa, además el operador se encuentra expuesto a situaciones en donde se pone en riesgo su salud. Se requiere de una extensa labor durante la fase de mecanizado del exceso de soldadura. Al realizar un análisis sobre los costos operacionales del proceso completo, se concluye que la mayor parte de estos están relacionados al alto requerimiento de horas/hombre durante la etapa de esmerilado.

En el presente trabajo se plantea un modelo para la programación *offline* para el trazado de trayectorias de mecanizado abrasivo para un brazo robótico industrial. La programación *offline* se basa en la visualización y control de los movimientos mediante simulación en un entorno CAD. Este método de programación tiene la ventaja de que permite anticipar y realizar las correcciones necesarias en las trayectorias de forma remota y de este modo se evitan colisiones, accidentes y otros.

Se desarrolla una estrategia de trabajo para la generación del código KRL usando el software CAD *Rhinoceros,* el entorno de programación gráfica *Grasshopper* y usando el control paramétrico de robots proporcionado por KUKA|prc. Mediante esta estrategia se logra conseguir la configuración del conjunto de trabajo, el trazado de trayectorias para el TCP sobre superficies y el diseño para el soporte de herramienta. Posterior a la modelación 3D de la celda de trabajo, la herramienta, su soporte, la superficie de trabajo y todos aquellos componentes de la celda de trabajo es posible obtener el código KRL.

Esta estrategia de trabajo planteada es un modelo de trabajo iterativo que permite la mejora continua del proceso al modificar parámetros fundamentales de la operación. Los efectos de los cambios introducidos podrán ser visualizados de manera inmediata.

Abstract

The current process of recovery of the turbine impellers is done by welding in the damaged areas and then rebuild the profile by means of abrasive machining. At present, this work is performed manually, so it is extensive and expensive, in addition the operator is exposed to situations where his health is at risk. Extensive work is required during the welding machining phase. When analyzing the operational costs of the complete process, it is concluded that most of these are related to the high requirement of man-hours during the grinding stage.

In the present work a model for offline programming is proposed for generate the trajectory of abrasive machining for an industrial robotic arm. The offline programming is based on the visualization and control of movements through simulation in a CAD environment. This method of programming has the advantage that it allows to anticipate and make the necessary corrections in the trajectories remotely and in this way collisions, accidents and others are avoided.

A working strategy for the generation of the KRL code is developed using Rhinoceros CAD software, the Grasshopper graphic programming environment and using the parametric robot control provided by KUKA|prc. Using this strategy, it's possible to obtain the configuration of the work cell, the tracing of trajectories for the TCP on surfaces and the design for the tool support. After the 3D modeling of the work cell, the tool, its support, the work surface and all those components of the work cell it is possible to obtain the KRL code.

This work strategy is an iterative work model that allows the continuous improvement of the process by modifying fundamental parameters of the operation. The effects of the changes introduced can be visualized immediately.

Glosario

CAD	“Computer Aided Design” o diseño asistido por computadora
KRL	“KUKA robot lenguaje”, es el lenguaje de programación de KUKA.
KUKA|prc	Software que se basa en el sistema de programación visual accesible vía Grasshopper. Proporciona bloques robóticos para integrar directamente un robot KUKA en un entorno paramétrico.
SING	Sistema interconectado del norte grande.
SIC	Sistema interconectado central
r.p.m	Revoluciones por minuto
CNC	Control numérico computarizado
HVOF	“High Velocity Oxigen Fuel”, técnica de aplicación de recubrimiento duro sobre superficies.
LED	“Light Emitting Diode”. Diodo emisor de luz

Índice

Resumen.....I

Abstract.....II

Glosario.....III

Introducción.....VII

Objetivos.....VIII

1. Industria hidroeléctrica en Chile y el mundo 1

1.1 ¿Qué es la energía hidroeléctrica?.....1

1.2 Hidroelectricidad en Chile.....2

1.3 Central Hidroeléctrica Alfalfal.....3

Turbina Hidráulica 5

1.1. Descripción general.....5

1.2. Turbinas de reacción.....5

Turbinas de acción o impulso.....6

1.3. Ecuación de Euler 6

1.4. Triángulos de velocidades 8

1.5. Numero especifico de revoluciones Ns 10

1.6. Velocidad especifica en función de otras características de la turbina Pelton ... 11

1.7. La turbina Pelton y su funcionamiento.....13

1.8. Los componentes de la turbina Pelton 15

1.9. La evolución de la manufactura de rodetes. 18

1.10. Manufactura del rodete 20

1.11. Materiales para construcción de rodetes.....22

1.12. Pérdidas y desgaste en turbina Pelton.....23

1.13. Desgaste en turbinas hidráulicas por sedimentos en turbinados 24

1.14. El daño en la turbina Pelton 25
2. Operación de maquinado abrasivo 27
2.1. Abrasivos 27
2.2. Las piedras de rectificado 28
2.4. Estructura 31
2.5. Grados de dureza 31
2.6. Compatibilidad entre la pieza de trabajo y el material abrasivo. 32
2.7. Fuerzas en el proceso de esmerilado 33
2.8. Energía especifica u 34
2.9. Fuerzas en esmerilado de superficies 35
2.10. Temperatura en el proceso de esmerilado 36
2.11. Desgaste de piedras abrasivas 38
2.12. Riesgos asociados a la operación de esmerilado 40
3. Robótica industrial 41
3.1. Definición 41
3.2. Estructura mecánica y clasificación 41
3.3. Sistema motor del robot industrial 44
3.4. Aplicaciones de los robots industriales 45
3.5. Implementación de brazo robótico industrial 46
3.6. La programación del robot industrial 47
3.7. Grasshopper y KUKA|prc 50
3.8. Movimientos del brazo robótico 51
4. Análisis del actual proceso de recuperación 54
5. Desarrollo del programa de esmerilado usando KUKA prc 59
5.1. La estrategia de mecanizado 60

5.2. Trazado de la trayectoria 64
5.3. Obtención del código KRL 68
6. Evaluación de alternativas bajo análisis de decisiones 71
6.1. Elección de la herramienta 71
6.2. Elección del dispositivo de seguridad anticolisión 76
7. Propuesta de mejora tecnológica y costo asociados 86
Conclusiones 90

Introducción

En las montañas geológicamente jóvenes como la cordillera de los Andes y los Himalayas, los flujos de agua que bajan desde la montaña contienen una alta concentración de sólidos suspendidos, en especial durante las temporadas de deshielo y lluvias.

Los componentes de las plantas hidroeléctricas ubicadas en estas zonas sufren severo desgaste debido a la acción erosiva de las partículas de sedimentos en los turbinados. Como consecuencia se tiene una reducción en la eficiencia de generación de electricidad producto de factores como la modificación del perfil hidráulico de los álabes, frecuentes interrupciones por necesidad de inspección y reparaciones y el extenso periodo de permanencia de los componentes en taller.

Se estima que actualmente un 28,8% de la matriz energética está sustentada en la energía hidroeléctrica (2). Considerando que el requerimiento energético siempre irá en crecimiento, se espera un incremento en la demanda de reparaciones de componentes, esto genera la necesidad de mejorar en el actual proceso de recuperación para convertirlo en un proceso de alta productividad.

La búsqueda de beneficios tanto sociales, económicos y tecnológicos nos conduce a la implementación de robots manipuladores industriales, pues su aplicación es idónea a este tipo de procesos en donde los procedimientos se encuentran bien definidos.

El uso de softwares de control paramétrico para la programación *offline* de los robots manipuladores es un gran aporte para el desarrollo en corto tiempo de alternativas de mejora al proceso, pues estas podrán ser puesta a prueba en un entorno CAD que simula el área de trabajo y en donde es posible introducir cambios y medir el beneficio de estos de manera inmediata.

Objetivos

Objetivos generales

Mejorar el proceso de recuperación de rodetes tipo Pelton asegurando calidad mediante la aplicación de tecnología de brazos robóticos industriales.

Objetivos específicos

- Analizar proceso actual de recuperación de rodetes tipo Pelton.
- Desarrollar metodología de trabajo para el brazo robótico mediante programación y simulación en software CAD.
- Diseñar soporte de herramienta para brazo robótico e integrar en la estrategia de trabajo, realizando modificaciones progresivas según las siguientes etapas:
    - Desarrollo enfocado a ensayos previos
    - Desarrollo enfocado a capacho aislado
    - Desarrollo enfocado a rodete completo
- Proponer mejora tecnológica del proceso de recuperación basada en antecedentes estudiados.
- Estimar costos asociados a la implementación de la mejora en el proceso.
- Generar recomendaciones y conclusiones sobre el trabajo desarrollado de acuerdo con los resultados obtenidos.

1. Industria hidroeléctrica en Chile y el mundo

1.1 ¿Qué es la energía hidroeléctrica?

Es la energía eléctrica que se obtiene a partir del aprovechamiento de la energía potencial y cinética de un flujo de agua. Esta energía es utilizada para provocar el movimiento rotacional de un rodete que se encuentra acoplado mediante un eje a un alternador, y así conseguir la transformación de energía mecánica a eléctrica. La generación de hidroelectricidad depende tanto del caudal como también de la altura neta del salto de agua.

A finales del siglo XIX, la energía hidroeléctrica se consolido como una fuente de generación de electricidad. La primera central hidroeléctrica se construyó en *Niagara Falls*, EE. UU., en el año1879.

A nivel mundial, se estima una potencia total instalada superior a los 1.000 [GW] y la producción en 2014 alcanzó los 1.437 [TWh], lo que según la agencia internacional de la energía (AIE), corresponde al 14% de la producción mundial.



Imagen 1.1 Actualmente la central hidroeléctrica más grande del mundo es la de Three Gorges,China. Esta cuenta con una potencia instalada de 22.500 [MW], compuesta por 32 turbinas Francis de 700 [MW]. (ref 1)

1.2 Hidroelectricidad en Chile

La energía hidráulica es una de las principales fuentes de abastecimiento energético de Chile. La abundancia del recurso hídrico en gran parte del país y el relieve del territorio permitió que tempranamente se utilizara la energía del agua para generar electricidad.

Si bien el potencial hidráulico de los ríos ya se había utilizado para la molienda de trigo y en algunas fábricas, no es hasta el año 1897 en que se construye la primera central para entregar hidroelectricidad a las minas de Lota.



Imagen 1. 2 sala de máquinas de central hidroeléctrica Chivilingo, la primera de Chile y segunda de Sudamérica. (ref 2)

La expansión del consumo de energía eléctrica obligo a aumentar la capacidad de generación. Es así como actualmente existen más de 140 centrales hidroeléctricas operando, las que podrían ser centrales de embalse junto a centrales y minicentrales de pasada. En total superan los 6.600 [MW] de potencia instalada, lo que corresponde a un 28,8 % de la generación de energía a nivel nacional tal como se muestra en el *Gráfico 1.1*. La potencia generada es distribuida entre en el sistema interconectado del norte grande (SING), el sistema interconectado central (SIC) y los sistemas medianos de Los Lagos y Aysén. Los sistemas medianos de Magallanes y la isla de Pascua no tienen generación de electricidad por fuentes hídricas.

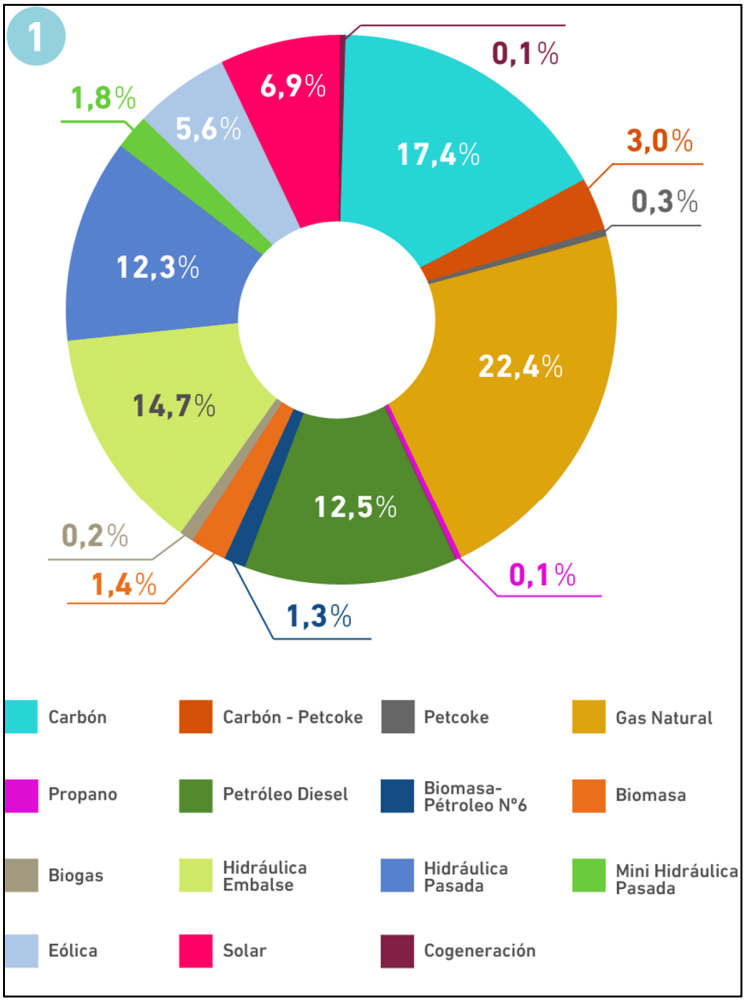


Gráfico 1.1 Matriz de generación nacional, diciembre 2016. (ref 3)

La central hidroeléctrica más grande en nuestro país es la central Ralco, ubicada en la comuna de Alto Bio Bio a 120 [km] al oriente de la ciudad de Los Ángeles. Esta cuenta con una potencia instalada de 690 [MW]. Conformada por dos turbinas tipo Francis de eje vertical, con potencias de 300 [MW] y 390 [MW].

1.3 Central Hidroeléctrica Alfalfal

Este complejo hidroeléctrico se encuentra ubicado en el cajón del rio colorado a 50 [Km] al sureste de Santiago. Esta central entró en servicio en el año 1992, y fue diseñada para producir una potencia de 178 [MW] al hacer aprovechamiento de las aguas provenientes del Rio Colorado.

Esta es una central de pasada, en donde operan dos unidades Pelton de eje vertical. En un inicio estas unidades tenían una potencia de 80 [MW] cada una, pero en la actualidad han sido reemplazadas por turbinas de alto desempeño que entregan una potencia de 100 [MW].

Tabla 1.1 Características técnicas Central Alfalfal (ref 4)

Central Alfalfal	
Altura bruta caída	715 [m]
Altura neta caída	690 [m]
Tipo turbina	Pelton
Disposición eje	Vertical
n° de turbinas	2
n° de inyectores por turbina	6
Potencia instalada	2 x 100 [MW]
Captación turbinados	16,5 [m^3/s]

Turbina Hidráulica

1.1. Descripción general

Una turbina hidráulica se puede definir como una turbomáquina en la cual se aprovecha la energía potencial y cinética de un flujo de agua para generar trabajo mecánico sobre un eje.

Las turbinas hidráulicas basan su funcionamiento en el teorema de la conservación de la cantidad de movimiento, que al aplicarlo en estas máquinas se denomina teorema de Euler. Todas las turbinas tienen un elemento rotatorio gira sobre un eje, el cual gira impulsado por la transformación de la energía cinética y potencial del agua.

Se pueden clasificar a los tipos de turbina en dos grupos principales, las turbinas de acción y las de reacción.

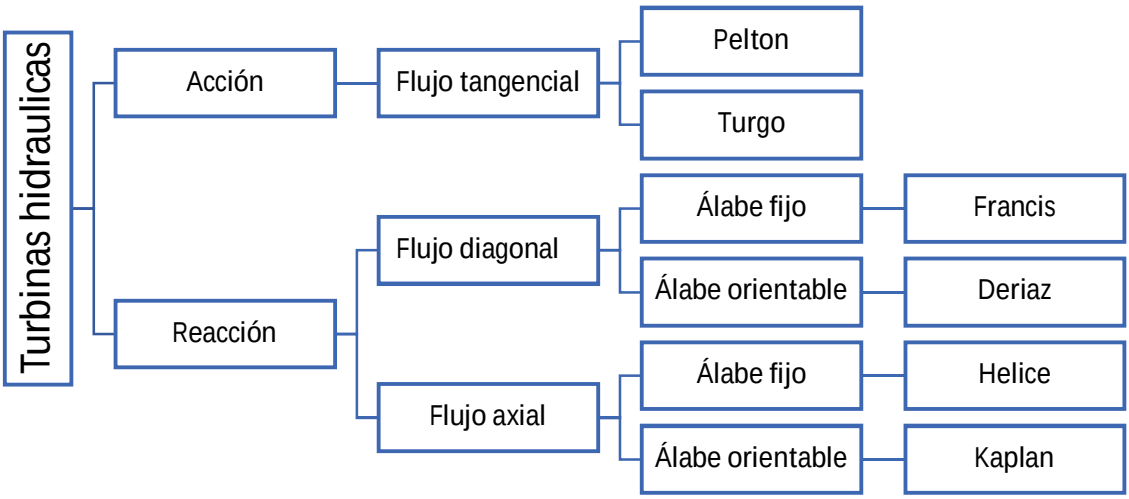


Gráfico 2.1 muestra la diversidad de turbinas hidráulicas. Turbinas de acción son aquellas en donde el agua impulsa al rodete únicamente por medio de energía cinética, como es el caso de la turbina Pelton. Mientras que turbinas de reacción utilizan la energía cinética y mayormente la energía de presión para mover el rodete

1.2. Turbinas de reacción

En este tipo de maquina el rodete se encuentra sumergido totalmente y el flujo de agua que atraviesa el rodete se encuentra a presión. A medida que el flujo avanza en el rodete entrega

su energía potencial y cinética, provocando el movimiento rotacional por el impulso generado por el cambio de dirección del flujo en el rodete.

Ya que la energía del flujo de agua es entregada al rodete de manera reactiva, la presión de salida del flujo es menor a la de entrada.

En la actualidad las turbinas de reacción más usadas en la industria hidroeléctrica son la turbina tipo Francis, turbinas Kaplan y turbinas de bulbo.

Turbinas de acción o impulso

En este tipo de turbina no existe variación de la presión del fluido a medida que avanza en el rodete, ya que este se encuentra a presión atmosférica. La energía potencial del fluido es completamente convertida en energía cinética en una tobera y luego es transferida al rodete por el impacto del flujo de agua a alta velocidad. Las turbinas de acción más usadas en la actualidad son la turbina Pelton y la turbina Turgo.

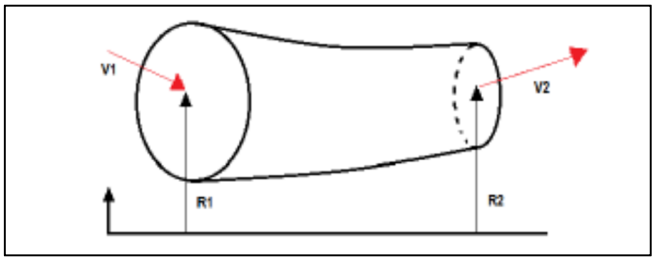
Tabla 2.1principales diferencias entre las dos clases de turbinas hidráulicas, puesto que turbinas de acción transforman la energía del agua, se requiere de un chorro de alta velocidad, por lo que se recomienda este tipo de turbinas en aplicación de gran salto, por lo que son ideales para centrales de pasada. Por otra parte, las turbinas de reacción aprovechan la energía de presión del agua, por lo que se recomienda este tipo de turbinas en aplicaciones donde se tiene un gran caudal de agua, como es el caso de centrales de embalse

Diferencias fundamentales entre turbinas		
	Acción	**Reacción**
Nombre	Pelton, Turgo	Francis, Hélice, Kaplan, Deriaz
Admisión	Por puntos	Total
Elementos	Inyector y rodete	Cámara espiral, distribuidor, rodete, etc.
Energía aportada	Cinética	Cinética y de presión
Campo de trabajo Q/H	Pequeña	Media y grande

1.3. Ecuación de Euler

La ecuación más importante en el estudio de turbinas hidráulicas es la ecuación de Euler o teorema de conservación de la cantidad de movimiento. Esta ecuación expresa la cantidad de energía por unidad de masa intercambiada por el fluido en el rodete. La ecuación de Euler es válida tanto para las turbinas de acción y como de reacción.

Cuando el fluido atraviesa por los alabes ejerce fuerza sobre estos, lo que se traduce en el movimiento del rotor. El cálculo de energía transferida se realiza suponiendo condiciones de flujo estable.



El momento M, transferido por el fluido a los alabes se expresa como:

$$M = \dot{m}(V_{u2}R_2 - V_{u1}R_{1)} \tag{2.1}$$

Donde:

$\dot{m}$: es el flujo másico en $[{}^{m^3}/_{s}]$

V_u: la proyección de la velocidad en la dirección de u, en $[{}^{m}/_{s}]$

R: la distancia al eje Z en $[m]$

Si el rotor de la turbina se encuentra girando a una velocidad constante ω, entonces se puede determinar la potencia transmitida P como:

$$P = M * \omega \tag{2.2}$$

$$P = \omega * \dot{m}(V_{u2}R_2 - V_{u1}R_{1)} \tag{2.3}$$

Además, como $\omega * R = u$, donde u es la velocidad tangencial. Al sustituir este término en la ecuación anterior se tiene:

$$P = \dot{m}(V_{u1}u_1 - V_{u2}u_{2)} \tag{2.4}$$

Así la energía transferida por unidad de masa al fluido se escribe de la forma:

$$E = V_{u1}u_1 - V_{u2}u_2 \tag{2.5}$$

La ecuación de Euler puede ser utilizada para flujos tanto compresibles como incompresibles, existiendo pérdidas o no al interior del canal del flujo. Luego esta relación es válida para todas las turbomáquinas

1.4. Triángulos de velocidades

Esta es una representación vectorial de las velocidades relativas involucradas en la transferencia de energía ocurrida en el rodete. Los triángulos de velocidades para la turbina Pelton se muestran en la siguiente figura

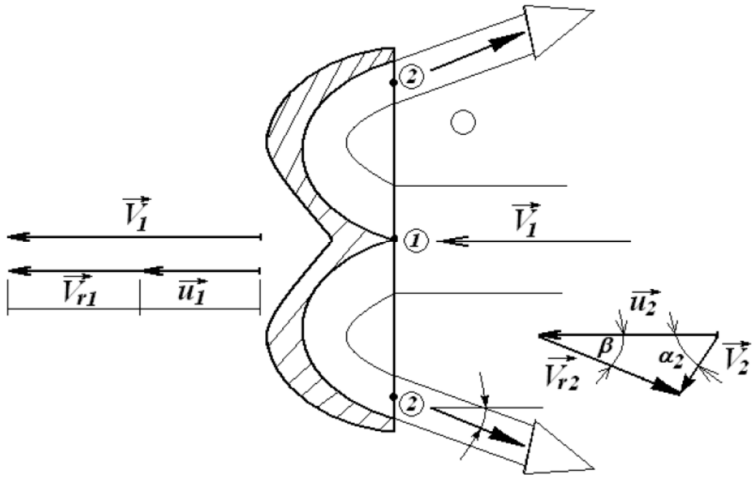


Imagen 2.1 esquema de triángulos de velocidades para turbina Pelton (ref 5)

En donde:

V_i: *velocidad absoluta del fluido*

u: *velocidad tangencial del rodete*

V_{ri}: *velocidad relativa*

Los subíndices 1 y 2 se refieren a la entrada y salida de la cuchara respectivamente.

De la imagen 5 se deducen las siguientes relaciones para las velocidades en el rodete:

$$V_1 = u_1 + V_{r1} \tag{2.6}$$

$$V_2 = u_2 + V_{r2}cos\beta \tag{2.7}$$

u representa a la velocidad tangencial del alabe, entonces se tiene:

$$u = u_1 = u_2 \tag{2.8}$$

$$V_1 = u + V_{r1} \tag{2.9}$$

$$V_2 = u + V_{r2}cos\beta \tag{2.10}$$

Considerando lo anterior se puede escribir una expresión para la potencia teórica en función de las componentes de la velocidad.

$$P = \dot{m}u(V_{r1} + V_{r2}cos\beta) \tag{2.11}$$

Además, se considera la perdida producto de la fricción en las paredes de la cuchara Δ

$$\Delta = 1 - \frac{V_{r1}}{V_{r2}} \tag{2.12}$$

De esta forma la potencia se puede expresar en función del factor de las perdidas como

$$P = \dot{m}u(1 + (1 - \Delta)cos\beta) \tag{2.13}$$

La velocidad V_1 con que sale el chorro desde la tobera, se determina según la ecuación de Torricelli:

$$V_1 = k_c\sqrt{2gH_n} \tag{2.14}$$

En donde k_c corresponde al coeficiente de la tobera, generalmente se utiliza el valor 0,97 (ref. 5)

La velocidad tangencial u_1 se calcula como:

$$u_1 = k_u\sqrt{2gH_n} \tag{2.15}$$

En donde k_u corresponde al coeficiente característico de la velocidad tangencial del rodete.

La potencia queda expresada como:

$$P = \dot{m}2gH_nk_u(k_c - k_u)(1 + (1 - \Delta)cos\beta) \tag{2.16}$$

La potencia máxima se obtiene cuando:

$$\frac{dP}{dk_u} = 0 \tag{2.17}$$

Derivando se obtiene:

$$\frac{dP}{dk_u} = \dot{m}2gH_n(1 + (1 - \Delta)cos\beta)(k_c - 2k_u) = 0 \quad (2.18)$$

La máxima potencia se tiene para cuando:

$$k_u = \frac{k_c}{2} \quad (2.19)$$

Al despejar k_c y k_u en las ecuaciones (2.14) y (2.15) respectivamente se tiene:

$$k_c = \frac{V_1}{\sqrt{2gH_n}} \; y \; k_u = \frac{u_1}{\sqrt{2gH_n}}$$

Entonces se tiene que la potencia máxima será alcanzada cuando la velocidad tangencial del rodete es igual a la mitad de la velocidad del chorro, así se tiene que:

$$u_1 = \frac{\sqrt{2gH}}{2} \quad (2.20)$$

1.5. Numero especifico de revoluciones N_s

La clasificación más precisa para turbinas hidráulicas se obtiene al asignar a toda la familia de turbinas que sean geométricamente semejantes un valor numérico llamado número especifico de revoluciones. Este se utiliza para clasificar los diversos tipos de turbinas, como también para definir el rango de altura de aplicación de estas. Los números más comúnmente usados en Sistema internacional:

$$N_s = \frac{N * P^{1/2}}{H^{5/4}} \quad (2.21)$$

En donde:

- N la velocidad angular en [r.p.m]
- P la potencia en [KW]
- H la altura neta en [m].

Si en la ecuación anterior consideramos que la potencia está en función de la altura de la caída, la velocidad especifica queda como una función de la altura.

$$N_s = f(H) \quad (2.22)$$

Esta función define el rango del valor de velocidad especifica N_s que tendrá una turbina para una altura dada. Como también permite realizar comparaciones entre diferentes tipos de turbina sobre una misma base de comparación de altura y caudal.

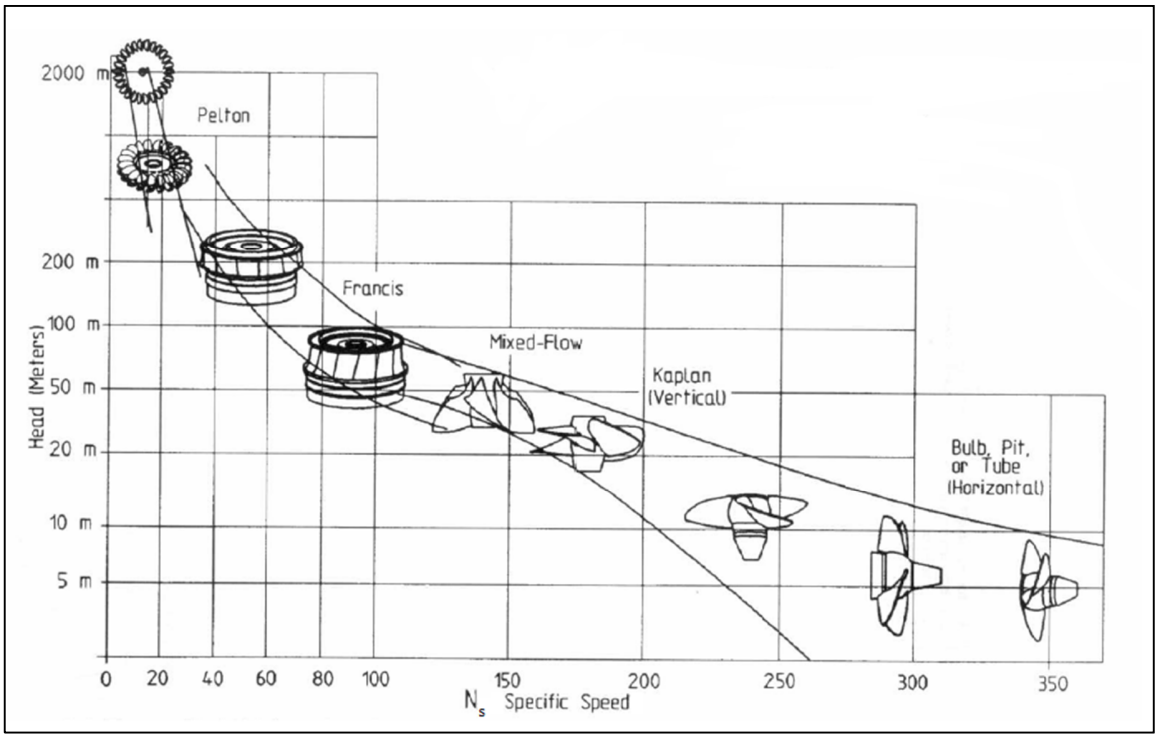


Gráfico 2.2 se muestra el rango útil para cada tipo de turbina, análisis basado en el número especifico de revoluciones. En el diagrama se puede apreciar que las turbinas Pelton operan con una gran altura neta y un pequeño caudal, turbinas Francis operan en valores de altura y caudal medios y por último las turbinas Kaplan operan en condiciones de baja altura y gran caudal.

1.6. Velocidad especifica en función de otras características de la turbina Pelton

La velocidad tangencial del rodete u puede expresarse en función del diámetro del rodete y su velocidad de angular como:

$$u = \frac{\pi D_1 N}{60} = k_u \sqrt{2gH} \tag{2.23}$$

Donde k_u es el coeficiente característico de la velocidad tangencial y D_1 es el diámetro nominal del rodete, es decir aquella circunferencia en donde el chorro incide de manera tangencial.

De la expresión anterior se deduce que:

$$N = \frac{60\, k_u \sqrt{2gH}}{\pi D_1} \tag{2.24}$$

Por otra parte, si se considera un chorro de diámetro d y velocidad V_1 ,se puede expresar el caudal como:

$$Q = \frac{\pi d^2}{4} V_1 \tag{2.25}$$

Si se considera que la velocidad V_1del chorro está dada por $k_c\sqrt{2gH}$, entonces:

$$Q = \frac{\pi d^2}{4} k_c \sqrt{2gH} \tag{2.26}$$

La velocidad específica también puede ser expresada en función del caudal Q como:

$$N_s = \frac{N * Q^{1/2}}{H^{3/4}} \tag{2.27}$$

Al reemplazar el valor del caudal y el de la velocidad de giro en la expresión de N_s se tiene:

$$N_s = \frac{\frac{60\, k_u \sqrt{2gH}}{\pi D_1} * \left[\frac{\pi d^2}{4} k_c \sqrt{2gH}\right]^{1/2}}{H^{3/4}} \tag{2.28}$$

$$N_s = \frac{60\, k_u (2g)^{3/4} H^{3/4}\, d\, {k_c}^{1/2}}{2\, H^{3/4}\, \pi^{1/2} D_1} \tag{2.29}$$

$$N_s = \frac{30\, (2g)^{3/4}}{\pi^{1/2}} k_u {k_c}^{1/2} \frac{d}{D_1} \tag{2.30}$$

Luego es notable que para modificar el valor de N_s no hay otra alternativa que variar la relación $\{{}^{d}/_{D_1}\}$.

Por otra parte, se debe recordar que el tamaño de los capachos está en función del diámetro d del chorro y este a su vez depende del valor de la altura neta y el caudal, siendo directamente proporcional al caudal e inversamente proporcional a la altura. Por lo tanto, al analizar la expresión anterior se deduce que turbinas que trabajan con un caudal pequeño y gran altura, y en consecuencia con una N_s pequeña, disponen de cucharas pequeñas en relación con el diámetro del rodete. Mientras que cuando se aumenta la N_s, es decir un mayor Q y menor H, aumenta el tamaño de las cucharas y disminuye el diámetro del rodete.

Los limites prácticos para esta relación, aproximadamente son:

$$\frac{1}{200} < \frac{d}{D_1} < \frac{1}{7}$$

Estas limitaciones se deben al motivo de que si se tiene un valor de cociente muy pequeño se tiene un rodete de gran diámetro con cucharas muy pequeñas. En esta condición se tiene un rodete de bajo rendimiento, pues trabaja con un pequeño chorro de agua que debe vencer la inercia de la masa del rodete de gran diámetro. En el caso opuesto, en donde se tiene un gran valor para la relación del cociente de diámetros, se tiene un rodete de pequeño diámetro con cucharas muy grandes. La operación de un rodete de esta geometría será ineficiente pues no existirá el espacio suficiente para la trayectoria del chorro de agua.



Imagen 2.2 se muestra un rodete con un valor alto del cociente de la relación d/D1, por lo que se tiene un rodete de capachos grandes y diámetro pequeño.

1.7. La turbina Pelton y su funcionamiento

Muchos inventores e ingenieros hidráulicos desarrollaban modelos de turbinas hidráulicas a mediados del siglo IXX, pero el principio de una cuchara con un partidor central pertenece a Lester A. Pelton

Pelton construyo la primera turbina Pelton en *Camptonville*, EE. UU. en el año 1878. Esta fue usada por mineros de oro en California para entregar potencia a pequeños molinos.

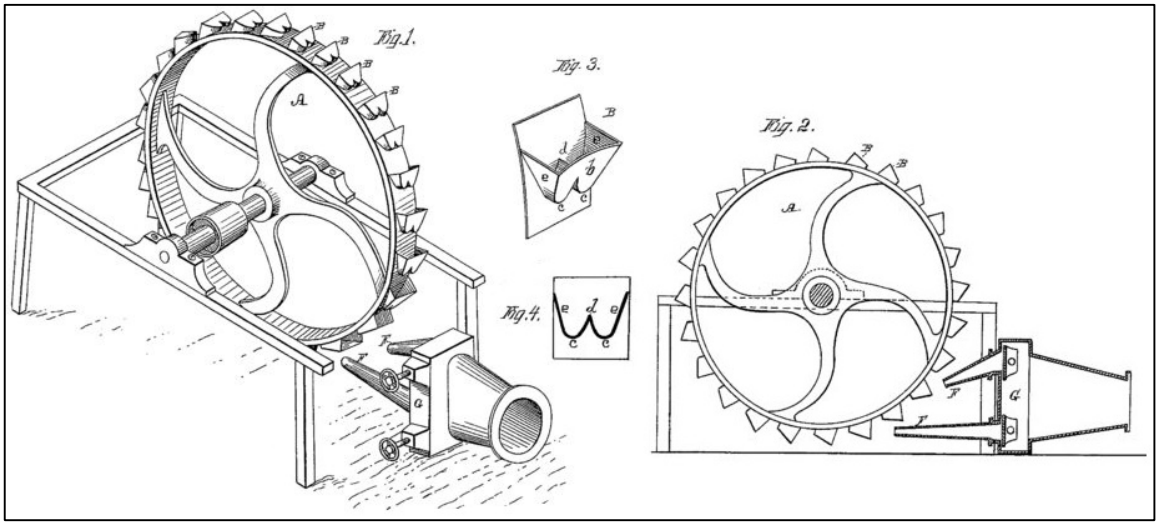


Imagen 2.3 diseño de primera turbina Pelton. Con patente del año 1880, se tiene principal innovación un capacho con partidor central. (ref 6)

El rodete Pelton utiliza la energía del agua que impacta sobre las cucharas que se encuentran ubicadas en la periferia de una rueda, para así generar trabajo mecánico.

En las turbinas Pelton no existe una diferencia de presión entre la entrada y salida de la turbina, ya que el chorro de agua se encuentra libre y a presión atmosférica. Toda la energía del flujo es convertida en energía cinética en el momento en que el agua pasa a través de una tobera, esta sale a una velocidad que corresponde a toda la altura del salto neto. Se logra el mayor impulso del rodete cuando el chorro incide de manera tangencial.

Las cucharas o capachos tienen forma cóncava, esta curvatura permite el cambio de la dirección del chorro de agua, forzándolo a salir por los bordes laterales. Es mediante este cambio rotundo de la trayectoria del chorro que se transmite el momentum al capacho y se genera el movimiento del rodete. Las cucharas están compuestas por dos lóbulos separados por una arista central, que tiene como función dividir de manera simétrica al chorro de agua incidente en dos láminas de fluido y así contrarrestar el empuje axial generado por el cambio de dirección del flujo en el capacho.

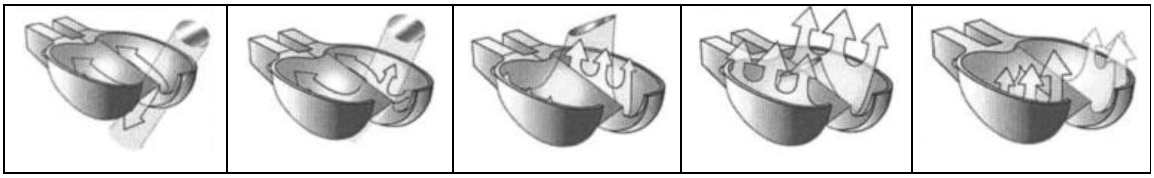


Imagen 2.4 muestra el desarrollo del proceso de división del chorro incidente en el capacho Pelton. La división simétrica del chorro permite compensar los esfuerzos axiales.

Una válvula tipo aguja regula la apertura de la tobera, consiguiendo así la regulación del caudal del chorro. Al tener control de la regulación del caudal se podrá mantener una velocidad constante del rodete, evitando fenómenos de embalamiento o reducción de la velocidad del rodete en el momento que ocurren fluctuaciones de la carga solicitada al alternador.

1.8. Los componentes de la turbina Pelton

La turbina Pelton consta fundamentalmente de dos componentes, rodete e inyector. Pero estos no pueden operar completamente por si solos y necesitan de otros elementos para realizar tareas como la distribución, direccionamiento, control de caudal, etc. A continuación, se hace una revisión de los componentes de la turbina Pelton.

2.9.1 El rodete

El rodete está constituido por una rueda o disco generalmente de acero, con una serie de álabes con forma de cucharas o cangilones ubicados en su periferia, el número de álabes usualmente va desde 17 a 26. El eje de la rueda puede estar en dos diferentes disposiciones, vertical u horizontal. En el caso de un eje horizontal se pueden instalar un número reducido de inyectores, pues la disposición en el plano vertical de la rueda dificulta la instalación de las líneas de alimentación de agua. Sin embargo, en esta disposición será más fácil la inspección del rodete y los inyectores. Al usar esta configuración de eje también se podrán usar dos rodetes gemelos para un único generador ubicado entre ellas.

Con una configuración de eje vertical, se facilita la instalación de las líneas de alimentación, por lo que es posible aumentar el número de inyectores y trabajar con un mayor caudal. De esta forma se logra incrementar la potencia.

A continuación, se presenta una tabla resumen en donde se comparan distintos aspectos sobre la disposición del eje de la turbina.

Tabla 2.2 comparativa de características de disposición horizontal o vertical del eje de rotación.

Eje horizontal	**Eje vertical**
1 a 3 chorros	4 a 6 chorros
Para pequeños caudales	Para grandes caudales
Potencia máxima 50 [MW]	Potencia desde 10 [MW]

Mayor requerimiento de espacio en casa de máquina, pero menor excavación	Necesita de una mayor excavación para la instalación
Adecuado para sala maquina en superficie	Adecuado para casa de maquina tipo caverna
Mayor facilidad de acceso para inspección del rodete	La inspección del rodete es más dificultosa por el acceso
Menor potencia por unidad	Se logra mayor potencia por unidad al instalar varios inyectores

2.9.2 Los alabes

El álabe o capacho, tiene forma de dos lóbulos separados por una arista central denominada partidor. El chorro incide en el partidor y se divide en dos partes iguales, cada una de estas partes se desvía en la dirección axial del rodete, manteniéndose así un equilibrio dinámico del componente en esa dirección. Los alabes tienen una incisura su parte delantera, denominada escotadura o boca del capacho, que sirve para reducir la distancia que existe entre el partidor y el inyector como también para mejorar la perpendicularidad en la llegada del chorro y así lograr un mejor aprovechamiento de la energía cinética del agua.

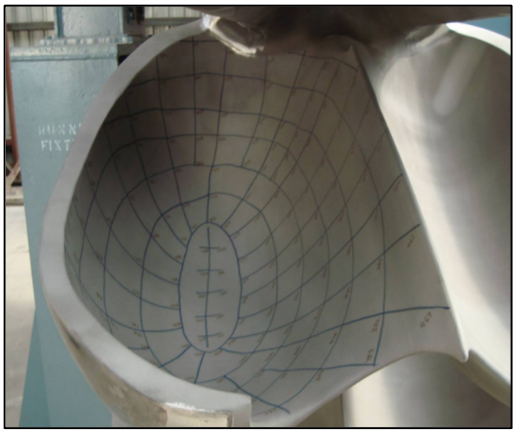


Imagen 2.53 primer plano de uno de los lóbulos constituyentes del capacho, se puede apreciar el borde afilado central que tiene como objetivo la separación simétrica del chorro de agua.

Los alabes pueden constituir una sola pieza junto al disco o rueda central estar sujetos a la rueda central por medio de bulones.

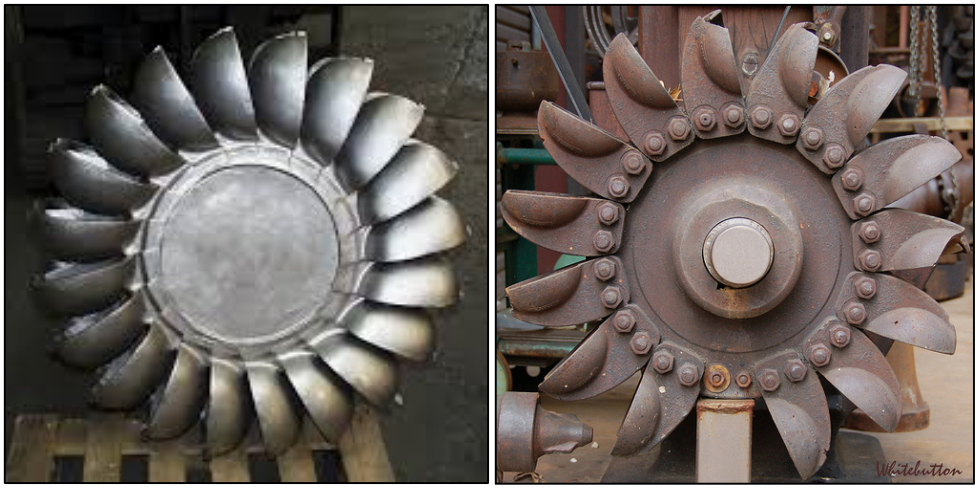


Imagen 2.64 se muestran dos alternativas de construcción de rodete, en el de la izquierda el rodete está conformado de una sola pieza, mientras que en el de la derecha los capachos son sujetos a una rueda central por medio de bulones.

2.9.2 Distribuidor de la turbina

Está constituido por uno o varios inyectores de agua, estos inyectores tienen como misión la inyección del chorro de agua de manera puntual, homogénea y en una dirección conveniente al rodete.

La conversión de toda la energía de presión en energía cinética, como también la regulación del caudal del chorro agua inyectado al rodete se genera en una tobera ubicada al final de la tubería de presión que conduce el agua a la turbina. Esta tobera está provista de una aguja de cierre que permite la regulación del caudal.

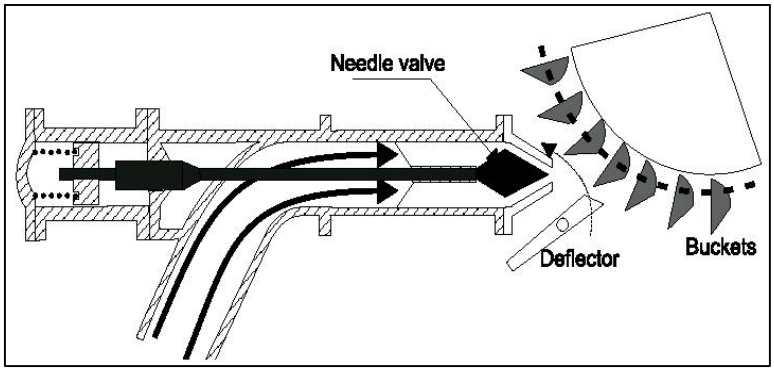


Imagen 2.7 muestra conjunto inyector, constituido por una tobera en donde se acelera el chorro de agua, el control del caudal es realizado mediante una válvula de aguja.

El proceso de cierre de la aguja debe ser pausado pues un cierre rápido puede causar daños por efecto del golpe de ariete, por lo que se incorpora un deflector para desviar la trayectoria

del chorro. Normalmente se utiliza el deflector cuando se requiere de un rápido cambio del régimen de giro, como es el caso de un rechazo de carga, en este caso el deflector desvía la trayectoria del chorro de agua y quita carga sobre el rodete, sin la necesidad del cierre rápido de la aguja.

1.9. La evolución de la manufactura de rodetes.

La preocupación por la confiabilidad de los rodetes Pelton fabricados en una sola pieza mediante proceso de fundición, propone a los fabricantes la necesidad de explorar alternativas que les permitan la fabricación de rodetes más resistentes.

Las turbinas Pelton están diseñadas para aplicaciones de gran altura neta (H_n), en consecuencia, los rodetes se encuentran sometidos al impacto de chorros de agua a alta velocidad. Es la gran fuerza aplicada por el chorro sobre el rodete en combinación con cargas cíclicas que cambian rápidamente y el efecto erosivo de los sedimentos en los turbinados, los que generan un gran desafío para el diseño y mejoramiento del proceso de manufactura como también para la elección de los materiales para la fabricación.

En particular, la zona de la raíz de los álabes del rodete se encuentra sometida a un alto nivel de tensión, las que junto a las características de la operación del rodete pueden conducir rápidamente a la fatiga y posterior falla del material. Fracturas pueden desarrollarse rápidamente, y si no se es advertido a tiempo puede resultar en la ruptura del rodete y desprendimiento de material.

El rodete Pelton fue construido tradicionalmente en una sola pieza mediante fundición. Las formas complejas del rodete hacen de su fabricación algo dificultoso y de alto consumo de tiempo por la necesidad de preparación de moldes y posterior mecanizado. Además, al fabricar piezas fundidas existe el riesgo de generación de un gran número de defectos tales como: inclusión de materias heterogéneas como escoria o arena; discontinuidades internas por porosidades o burbujas, composición y estructura inadecuada por temple localizado, etc. Reconociendo la incidencia de este tipo de defectos asociados al proceso de fundición, a términos de la década de los 80, los fabricantes de rodetes iniciaron el desarrollo de un análisis detallado del estado de esfuerzos del rodete Pelton mediante análisis de elementos finitos y mecánica de propagación de fracturas usando herramientas de mecánica computacional y haciendo énfasis en la eliminación de ocurrencia de fallas por esfuerzos

residuales. Se determinó que la aplicación de tecnología de forja y soldadura incrementa la resistencia del rodete, en particular en la zona de la raíz del capacho, como también se reduce la probabilidad de falla del material.

En los diseños iniciales los capachos estaban conformados por tres piezas. Una pieza central junto a dos laterales, las que eran fundidas en acero inoxidable austenítico, para luego ser unidas mediante soldadura y finalmente mecanizado hasta lograr la geometría final. Sin embargo, este método de construcción no fue utilizado por tiempo prolongado en la industria, pues los fabricantes optaron por la fabricación de los álabes de manera independiente, ya sean fundidos o forjados en una sola pieza, los que posteriormente se agregan al disco central mediante soldadura.

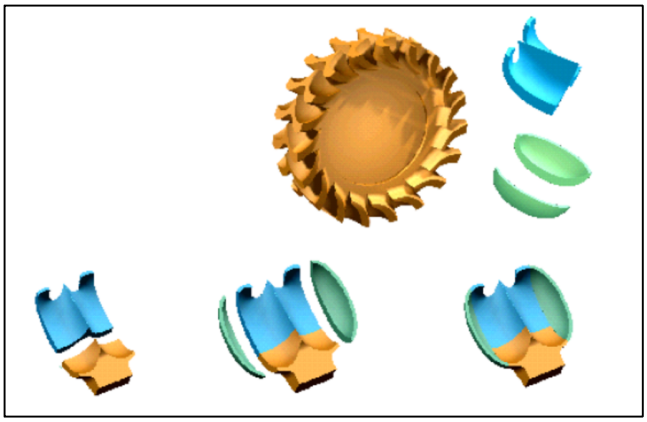


Imagen 2.8 diseño modular del rodete Pelton, en este los capachos son construidos en partes y luego todas unidas a una rueda central para conformar el rodete.

Los rodetes también pueden ser manufacturados a partir de un bloque macizo de material utilizando mecanizado CNC. Debido al alto costo de los materiales, este método es aplicado principalmente para la construcción de rodetes pequeños. Se estima que al utilizar este método de construcción cerca del 70% del material es removido del bloque central durante el mecanizado.



Imagen 2.9 rodete Pelton para salto de 200 [m] fabricado por mecanizado utilizando un bloque de acero inoxidable ZG06Cr13Ni4Mo como material base.

1.10. Manufactura del rodete

Dependiendo de la aplicación que se tenga, el rodete Pelton podrá ser manufacturado de diversas maneras. A continuación, se hace repaso de los métodos de manufactura utilizados en la actualidad.

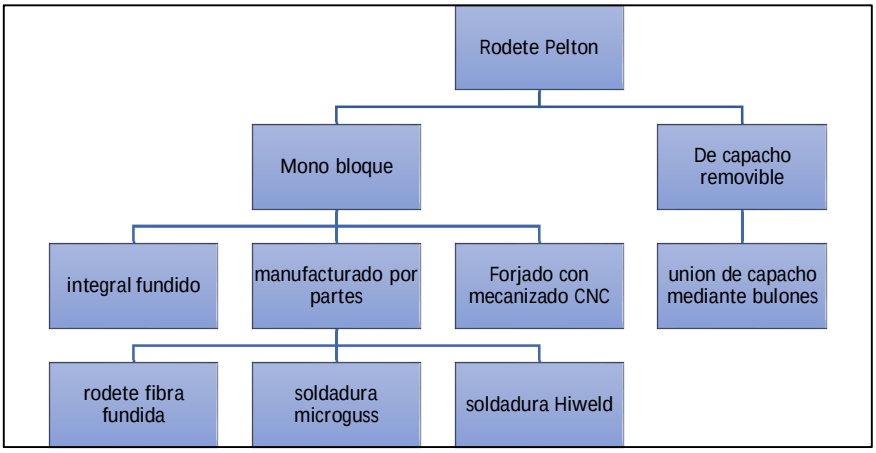


Gráfico 2.3 resumen de los actuales métodos de manufactura de rodetes tipo Pelton, estos podrán ser de capachos intercambiables o fijos a la rueda central.

- Rodete integral fundido: este es el método convencional de manufactura de los rodetes. Se requiere de fundición de precisión pues existen riesgos de generación de defectos y con ellos concentradores de esfuerzos asociados.
- Rodete forjado con mecanizado CNC: el disco central es forjado, luego se mecaniza la geometría del rodete y sus álabes mediante equipo CNC.

- Rodete de fibra fundida: concepto reciente de manufactura, consiste en un disco forjado al cual se le unen capachos de plástico reforzado. Este tipo de rodete está recomendado para alturas de menos de 400 [m].
- Rodete con soldadura *Microguss*: el disco central del rodete junto a la raíz y primera mitad de los capachos son fabricados mediante proceso de forja, luego la segunda parte de los capachos es generada mediante aporte de soldadura por medio de un brazo robótico industrial.

  El más grande de los rodetes fabricados utilizando este método se encuentra en la planta de *Biuedron*, Suiza. Este tiene un peso de aprox. 30 [tons], con potencia de 423 [MW] y una altura de 1869 [m].

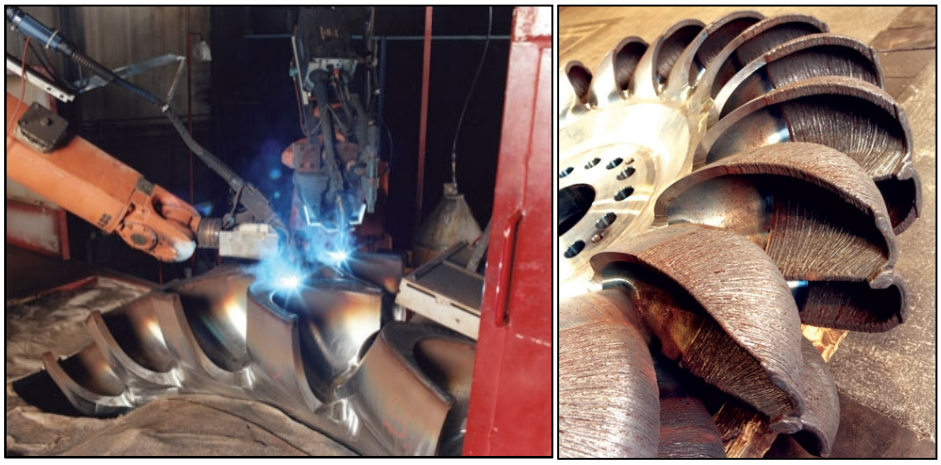


Imagen 2.105 proceso Microguss se clasifica como un proceso de manufactura aditiva. El rodete es "impreso" por medio de aporte de soldadura apoyado de tecnología de brazo robótico. En la imagen de la derecha se muestran los resultados de la aplicación de soldadura.(ref 7)

- Soldadura "*Hiweld*": En este método tanto la parte exterior de los capachos como la rueda central están fabricados mediante forja, y luego ambas partes son unidas mediante soldadura manual. Para lograr este tipo de unión soldada, se ha desarrollado un nuevo tipo de transferencia metálica, llamado PCS por sus siglas en ingles de "*Pulse Controlled Spray Arc*", en él se combinan el método de transferencia por pulso y la transferencia spray, de esta forma se logra una soldadura sin salpicaduras, con alta tasa de transferencia metálica, buena penetración y una fusión fuerte.



Imagen 2.11 se muestra a un operario realizando la unión del capacho a su raíz por medio de aporte de soldadura. En la imagen de la derecha se aprecian los resultados.(ref 8)

1.11. Materiales para construcción de rodetes

El material de los álabes debe ser resistente a la fatiga, la corrosión y la erosión. Cuando estos requerimientos son moderados puede bastar la fundición gris como material base, pero si las condiciones de trabajo son más drásticas se debe recurrir a materiales tales como aceros con aleación de cromo-níquel-molibdeno y aceros austeno -ferríticos, pues estos presentan una resistencia extraordinaria a la cavitación y la abrasión.

Los rodetes de alto desempeño son fabricados en acero inoxidable martensítico, pues este material combina excelentes propiedades de resistencia y tenacidad con una resistencia media a la corrosión, estos aceros se caracterizan por tener una estructura cristalina tetragonal centrada en el cuerpo *BCT*, lo que les otorga propiedades tales como una buena resistencia a la corrosión y al desgaste, este tipo de acero tiene capacidad de ser endurecible mediante tratamiento térmico y por lo tanto pueden desarrollar altos niveles de resistencia mecánica y dureza.

En la actualidad para mejorar la durabilidad de los rodetes se realiza la aplicación de recubiertos mediante proceso de metalizado *spray*, ya sea *HVOF* o plasma *spray*, con el cual se logra aplicar finas capas de recubrimiento duro sobre la superficie, mejorando así la resistencia de la superficie a la abrasión y erosión. El proceso de recubrimiento consiste en la proyección de partículas de carburo. Las partículas son fundidas en una precámara de combustión y luego proyectadas a través de una tobera, estas viajan a velocidad del orden match 2 o 3, e impactan sobre la superficie de trabajo. Las partículas que impactan la

superficie quedan adheridas a ella, generando una capa de recubrimiento sobre la superficie sin afectarla térmicamente.

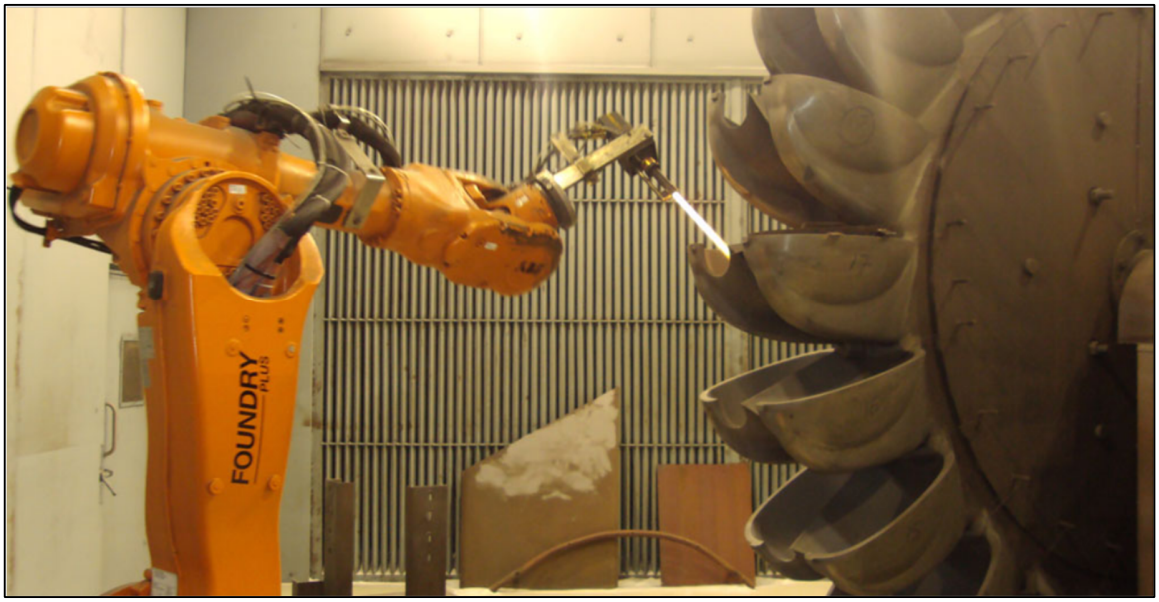


Imagen 2.126 El procedimiento de recubrimiento con HVOF podrá estar apoyado de tecnología de brazos robóticos industriales para obtener mejores resultados. La imagen muestra la aplicación de recubrimiento duro con HVOF sobre la superficie de un rodete Pelton de 100 MW utilizando tecnología de brazo robótico

1.12. Pérdidas y desgaste en turbina Pelton

Los conjuntos de turbina Pelton tienen tres componentes críticos en donde se desarrollan pérdidas de eficiencia, estos son:

- Rodete: Producto del efecto erosivo de los sedimentos suspendidos en los turbinados se produce deterioro de la superficie y modificación del perfil hidráulico de los capachos, afectando a la trayectoria del chorro de agua y provocando excesivo roce del flujo de agua y turbulencia. La modificación del perfil hidráulico podría ser tal de producir interferencia entre el chorro saliente de un capacho y los capachos adyacentes. Se estima que las pérdidas de eficiencia que se producen en este componente son cercanas al 80%.
- Tobera y aguja: Aquí las pérdidas son producto de un perfil de velocidad desbalanceado y fluctuaciones de turbulencia, teniendo como consecuencia una “mala calidad de chorro”. Produciéndose un chorro desviado y disperso, desaprovechando la transformación de energía de presión en energía cinética. Las pérdidas se estiman cercanas al 10%.

- Distribuidor: Las pérdidas se deben al roce del agua contra las paredes de los conductos. Se estiman pérdidas cercanas al 10%.

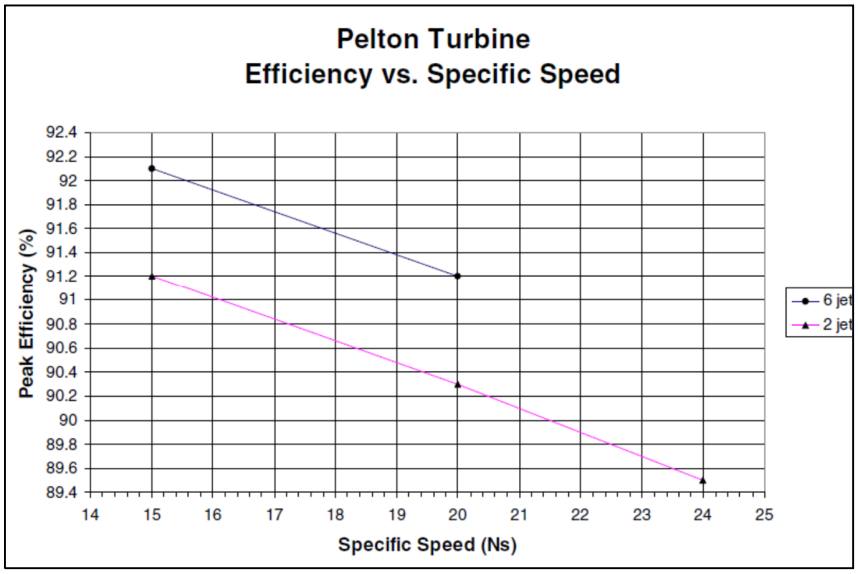


Gráfico 2.4 muestra los peak d eficiencia de las turbinas Pelton modernas. Notar que para turbinas con 6 jets (chorros) la velocidad especifica debe ser a lo más 20, para así prevenir una excesiva caída de la eficiencia en carga plena.

1.13. Desgaste en turbinas hidráulicas por sedimentos en turbinados

1.13.1. El desgaste erosivo

En este proceso se produce la remoción de material producto del impacto de un cuerpo, el cual viaja suspendido en un fluido, sobre una superficie. Durante el impacto la partícula solida trasfiere su energía a la superficie, así cuanto mayor sea la velocidad con que impactan las partículas, mayor será el efecto de erosión provocado. Este proceso de erosión es influenciado por factores tales como: la velocidad promedio de las partículas, la masa de las partículas, concentración de partículas abrasivas en el fluido, distribución del tamaño de partículas, tamaño promedio de las partículas, ángulo de incidencia, tiempo del intervalo de ataque y la resistencia estructural del material.

Este es uno de los mayores problemas en el campo de la industria hidroeléctrica, en donde los componentes de las turbinas se ven afectados por la acción erosiva de los sedimentos que son arrastrados en el flujo de agua. Algunos tipos especiales de desgaste erosivo son:

- Erosión por cavitación, esta ocurre cuando un sólido y un fluido se encuentran en movimiento relativo, puede llegar a bajar la presión del fluido hasta

alcanzar la presión de vapor del líquido, provocando un cambio de estado local del fluido, en consecuencia, existe una formación de burbujas inestables, las cuales explotan en las cercanías de la superficie causando daños.

- Erosión por impacto líquido, es causado por repetidos impactos entre la superficie y pequeños cuerpos de líquido, los cuales aplican cargas del tipo golpe de ariete y producen grietas, las que luego se convierten en pequeñas cavidades. Nuevos golpes de ariete afectan la zona de la cavidad y con esto se acentúa el efecto de las ondas de presión sobre la superficie y continuando con el proceso de remoción de material.

1.14. El daño en la turbina Pelton

En las turbinas tipo Pelton se intensifica la acción erosiva de los sedimentos suspendidos en los turbinados debido a la alta velocidad de impacto del chorro de agua sobre la superficie del álabe. Se estima que la velocidad del chorro a la salida de la tobera puede ser mayor a 100 $[m/s]$.

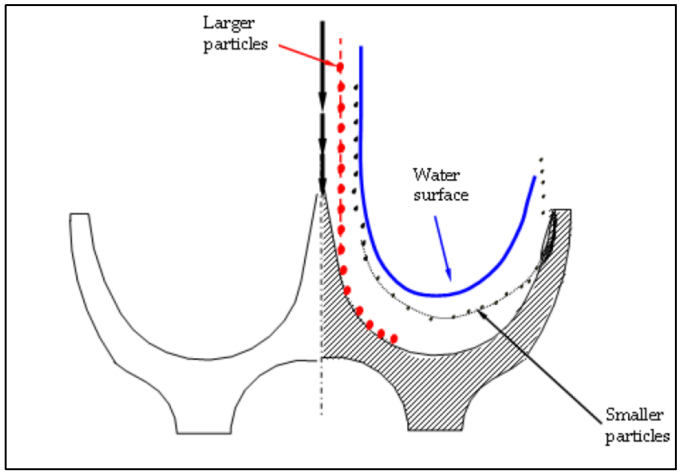


Imagen 7 se muestra el proceso de separación de partículas finas de las gruesas al interior del flujo, la separación es producto de la alta aceleración de las partículas.(ref 9)

La aceleración de las partículas se encuentra en el rango de 50.000 $[m/s^2]$ a 100.000 $[m/s^2]$.Tal aceleración provoca la separación de las partículas finas de las gruesas en la línea de flujo. Los efectos erosivos de estas partículas son diferentes, para las partículas gruesas la acción erosiva se concentra en las zonas en donde el chorro impacta directamente en el álabe, tales como partidor (*splitter*), en estas zonas el daño es causado por la energía de

impacto de las partículas sobre la superficie. Mientras que las partículas finas causan daño por la acción cortante de los bordes afilados, su acción se concentra en las zonas de salida del chorro del álabe y en mayor parte en la tobera y aguja.



Imagen 2.14 se muestra daño producido por el desgaste erosivo por efecto de las partículas de sedimentos en los turbinados. El perfil hidráulico se ha modificado notoriamente.

2. Operación de maquinado abrasivo

El esmerilado, amolado u operación de maquinado abrasivo se define como el proceso de remoción de material mediante partículas abrasivas, las que se encuentran unidas en forma de disco o piedra mediante un aglomerante.

Cuando las partículas abrasivas en movimiento se encuentran en contacto con la pieza de trabajo, cada una de ellas actúa como pequeñas herramientas de corte, los filos de estas partículas arrancan pequeñas porciones de material. Es un error común creer que las piedras abrasivas remueven material por la fuerza de roce que se ejerce sobre la superficie, pues este es un proceso de mecanizado tal como el taladrado, fresado o torneado.

El mecanizado abrasivo es necesario y económico cuando se requiere mecanizar materiales de alta dureza y se tienen altas exigencias tanto de acabado superficial como de tolerancia dimensional. Frente a esta situación, en la cual los métodos tradicionales de arranque de viruta no satisfacen la operación, el mecanizado abrasivo es la solución idónea.

Generalmente los procesos de mecanizado abrasivo son utilizados como operación de acabado, pero en algunos casos es posible lograr la remoción de grandes cantidades de material siendo comparable con las operaciones de mecanizado convencional.

Algunos de los motivos por los cuales el proceso de maquinado abrasivo es importante en la actualidad son los siguientes:

- Podrá usarse sobre gran variedad de materiales de trabajo, desde metales dúctiles hasta aceros endurecidos, como también en materiales no metálicos.
- Mediante esta operación se logran satisfacer altos requerimientos de acabados superficial.
- Se logra una estrecha tolerancia dimensional.

2.1. Abrasivos

Un abrasivo es una pequeña partícula dura, de forma irregular y que posee múltiples aristas afiladas, a diferencia de la geometría bien definida de las herramientas de corte tradicional. Los abrasivos realizan el proceso de arranque de viruta mediante la remoción de pequeñas cantidades de material de la superficie.

Debido a su alta dureza, los abrasivos son usados en procesos de acabado de superficies de metales y aleaciones tratados térmicamente, y otras aplicaciones como por ejemplo la remoción de exceso de soldadura.

Las propiedades generales de un material abrasivo para herramientas incluyen: alta dureza, resistencia al desgaste, tenacidad y friabilidad. De estas propiedades, las tres primeras son deseables de cualquier material de herramienta de corte, mientras que la friabilidad se define como la aptitud de una partícula para fracturarse. Es una propiedad necesaria, pues así se asegura que los granos abrasivos logren la renovación de filos. Una alta friabilidad indica baja resistencia a la fractura de la partícula. Por lo tanto, un grano abrasivo con una alta friabilidad se fragmentará con mayor rapidez.

En la actualidad, los materiales abrasivos de mayor importancia comercial son el Óxido de aluminio (Al_2O_3), Carburo de silicio (SiC), Nitruro de boro cubico (CBN) y el Diamante.

Estos abrasivos tienen mayor dureza que los materiales convencionales de las herramientas de corte. Esto se puede ver en la siguiente tabla de referencia.

Tabla 3.1 durezas para diferentes materiales en la escala Knoop

Intervalos de dureza Knoop para diversos materiales			
Vidrio común	350-500	**Nitruro de titanio**	2000
Cuarzo	800-1100	**Carburo de titanio**	1800-3200
Oxido de Zirconio	1000	**Carburo de Silicio**	2100-3000
Aceros endurecidos	700-1300	**Carburo de boro**	2800
Carburo de tungsteno	1800-2400	**Nitruro de boro cúbico**	4000-5000
Oxido de aluminio	2000-3000	**Diamante**	7000-8000

2.2. Las piedras de rectificado

Ya que cada grano abrasivo solo retira una cantidad muy pequeña de material, es posible lograr altas velocidades de remoción de material en el momento que una gran cantidad de granos actúen de manera simultánea. Esto es posible al utilizar abrasivos aglutinados en donde los granos se encuentran distribuidos y orientados de manera aleatoria.

En una piedra abrasiva los granos se mantienen juntos mediante un material aglutinante, el cual actúa como puente de soporte entre los granos. Se genera una estructura porosa,

conformada por los granos abrasivos, los puentes de aglutinante y porosidades entre ellos. Estas porosidades o espacios vacíos entre los granos son fundamentales, pues dan el espacio necesario para la salida de las virutas que se generan como también ayudan al enfriamiento de la herramienta. No podría ser posible utilizar un disco sin porosidades, denso y sólido por completo, pues no existirá el espacio necesario para la formación y posterior salida de la viruta.

Los granos ubicados en la superficie de la muela se encuentran realizando corte, por lo que sus aristas filosas se van desgastando progresivamente con el uso, reduciendo así su capacidad de corte. Producto de esto se genera un aumento de la fuerza sobre los granos abrasivos, ocasionando su ruptura y desprendimiento, dando paso a nuevos filos activos en la superficie. Este proceso es llamado auto afilado de la muela.

En el caso de operar con una muela dura, en donde los granos tengan gran tenacidad o que el aglomerante sea muy resistente, la renovación de los filos no se produce o solo ocurre de manera parcial. Esto tiene como consecuencias el aumento de la zona de desgaste de los granos produciéndose fricción excesiva y sobrecalentamiento de la superficie de la pieza. Por el contrario, al operar con una muela blanda, los granos se desprenderán con facilidad. Como consecuencia se tiene que la muela o piedra pierde rápidamente su forma y dimensiones.

2.3. Aglutinantes

Diferentes piedras están constituidas por diferentes tipos de granos y diferente material aglutinante, esto dependerá de la aplicación. Los aglutinantes más comunes utilizados en piedras abrasivas en la industria son:

- Vitrificado: también conocido como aglutinante cerámico, es el material de unión más común utilizado en la industria. Los constituyentes básicos de este tipo de aglutinante son arcillas y feldespato, que corresponde al grupo de minerales denominados aluminosilicatos.

  Para la construcción de una piedra abrasiva, se juntan las arcillas y feldespato junto a los abrasivos, se humedecen hasta obtener una masa homogénea y luego se moldean a presión en una matriz de acero que le da la forma requerida. Luego son secadas y posteriormente sometidas a un proceso de cocción lenta y progresiva hasta llegar a los 1250 °C con el fin de fundir el

vidrio y desarrollar la estructura de soporte de los granos. El proceso de horneado puede tomar alrededor de 6 días

Las piedras con aglutinante vitrificado son resistentes, rígidas y porosas. Sin embargo, son frágiles y carecen de resistencia a choques mecánicos y térmicos. Frente a esta carencia de resistencia a impactos mecánicos es que estas piedras son también fabricadas usando un refuerzo de acero. La velocidad periférica máxima permitida para piedras y ruedas con este tipo de aglomerante es de entre 35 [m/s], pudiendo llegar a velocidades muy superiores 125 [m/s] para el caso de aglomerantes vitrificados especiales.

- Resinoides: Este material aglutinante es una resina termofija orgánica. Las piedras o muelas son fabricadas mezclado el material abrasivo con la resina y otros aditivos fenólicos, para luego prensar la mezcla y darle la forma deseada, finalmente la resina es curada por un periodo cercano a 50 horas a una temperatura de 175 [°C].

  Los discos y piedras abrasivos fabricados con aglomerante resinoide se caracterizan por ser más flexibles en comparación a los vitrificados, esto gracias a que el módulo elástico de la resina termofija es menor y por lo tanto admite mayor deformación. Las piedras tienen gran resistencia y se utilizan para esmerilado grueso y operación de corte.

  La velocidad periférica máxima permitida es de 50 m/s, pudiendo llegar excepcionalmente 80 m/s con aglomerantes resinosos especiales.
- Silicatos: Son silicato de sodio horneados, estos aglomerantes de silicato otorgan mayor facilidad en el proceso de renovación de filos que los del tipo vitrificado. Este tipo de aglomerante está bien indicado para operaciones en donde el incremento de temperatura debe mantenerse al mínimo, como por ejemplo en el afilado de herramientas de corte. No está recomendado para usos en donde se aplique alta carga.
- Caucho: se trata de caucho vulcanizado duro. Se caracteriza por poseer alta tenacidad y flexibilidad. Se emplea para la fabricación de muelas delgadas
- Goma laca: se utiliza en acabados lisos en superficies duras, además se aplican para corte en frio de aceros de herramienta.

2.4. Estructura

Está determina por las proporciones volumétricas ocupadas por el abrasivo, el ligante y los espacios vacíos o poros. Si se considera al volumen de abrasivo como un parámetro constante la estructura de la muela dependerá de las proporciones de material aglomerante y los espacios vacíos entre granos. Así una muela será de estructura abierta o cerrada si posee más o menos volumen de espacios vacíos.

En general se recomienda el uso de estructuras abiertas en situaciones que se desee proveer mayor espacio libre a las virutas, mientras que la estructura cerrada estará indicada para cuando se desee un mejor acabado superficial y control dimensional.

Una estructura más abierta se comporta como una muela blanda, pues se facilita la remoción de virutas. Si la estructura es más cerrada o densa, tendrá la tendencia a que los espacios entre granos se llenen de virutas y se comporte como una muela dura. El grado de densidad de la estructura se indica con un sistema numeral creciente, partiendo por las estructuras más densas o cerradas hacia las de estructura más abierta.

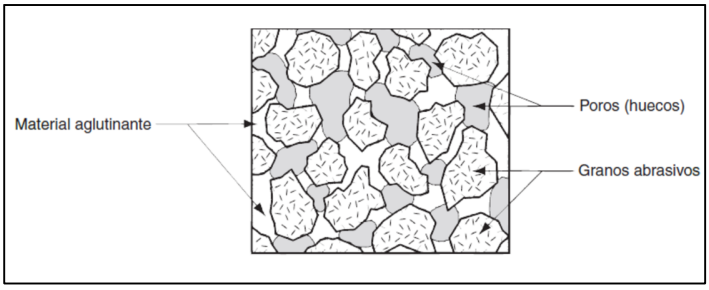


Imagen 8.1 se esquematiza la composición de las muelas abrasivas, es necesaria la existencia de huecos entre granos para permitir la formación y salida de las virutas.

2.5. Grados de dureza

El grado de dureza de la piedra se refiere a la facilidad de renovación de partículas abrasivas. Este valor se encuentra directamente relacionado con la tenacidad del aglomerante. Una piedra blanda es aquella en donde las partículas abrasivas se renuevan fácilmente, mientras que en una piedra dura el aglomerante se opone al proceso de desprendimiento de los granos. Tanto la norma ISO como la norma ANSI clasifican el grado de las muelas mediante un sistema de letras, desde la A para una muy suave hasta la Z para una muy dura.

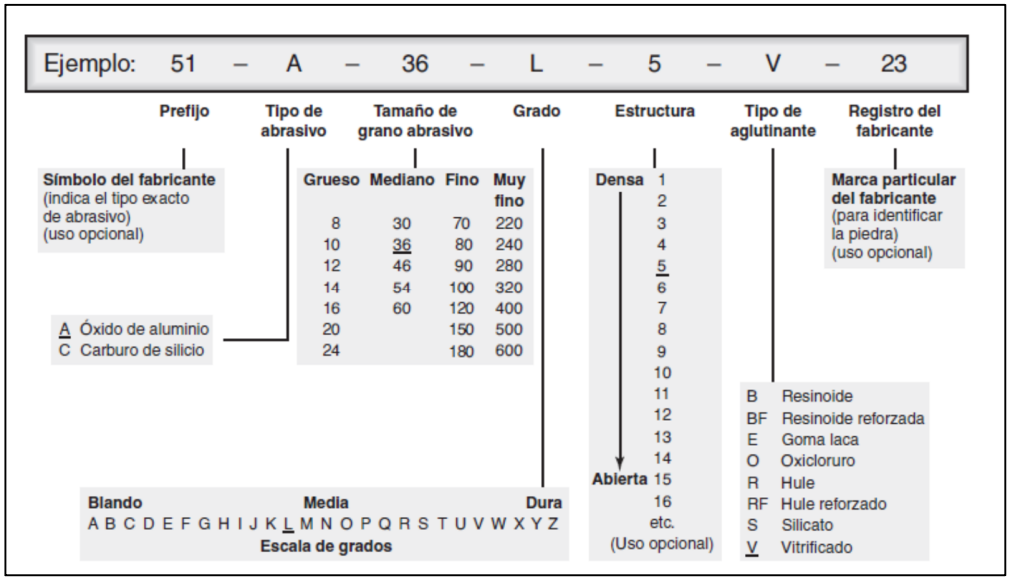


Imagen 3.2 Los abrasivos están marcados con un sistema estandarizado de letras y números, los que indican el tipo de abrasivo, tamaño de grano, grado, estructura y tipo de aglutinante. Aglomerantes vitrificados y silicatos se encuentran generalmente entre los rangos de suave y muy duro, mientras que aglomerantes resinoides están en el rango de muy suave a duro.

El grado de dureza debe ser bien seleccionado acorde a la operación. Si una piedra abrasiva es muy blanda para una operación se tendrá un desgaste muy prematuro. Por otra parte, si una piedra es muy dura para un trabajo, las partículas abrasivas se embotarán, ya que el aglomerante no permite la renovación de los granos abrasivos. Por lo tanto, si la dureza ha sido bien seleccionada, la piedra se auto afilará oportunamente, dejando desprender los granos de filo gastado y exponiendo granos nuevos.

Como regla general se tiene que cuanto más duro sea el material de la superficie a esmerilar, el grado de dureza debe ser más blando, y viceversa. Lo anterior se justifica en que los materiales duros provocan un desgaste más rápido de los filos de los granos, por lo que se necesita aumentar la tasa de renovación de los granos de la superficie, lo que se logra utilizando una estructura más blanda.

2.6. Compatibilidad entre la pieza de trabajo y el material abrasivo.

La afinidad de un grano abrasivo con el material de la pieza de trabajo es un factor importante para considerar. El grado de desgaste de los granos durante la operación dependerá de la reactividad que se tenga con el material de trabajo. La reactividad es la capacidad de un

material de reaccionar químicamente en presencia de otro, por lo que cuanto menor sea la reactividad entre el material base y la herramienta, menor será el desgaste de esta.

Por lo general se hacen las siguientes recomendaciones para la selección de materiales abrasivos:

- Oxido de aluminio Al_2O_3: Es el material abrasivo más común, se utiliza para aceros al carbono, aceros de aleados y otras aleaciones ferrosas.
- Carburo de silicio SiC : Material de similar dureza al Oxido de aluminio, pero de menor tenacidad. Se utiliza en el trabajo de metales no ferrosos, fundición de hierro, cerámicos, vidrio y mármol. No puede ser utilizado para trabajo en acero debido a la fuerte afinidad química entre el carbono del SiC y el Fe del acero.
- Nitruro de boro cubico: aceros y hierros fundidos que tengan una dureza superior a 50 HRC como para aceros de herramienta endurecidos.
- Diamante: Podrá ser este material encontrado de forma natural o sintetizado. Utilizado en mecanizado de materiales abrasivos duros tales como cerámicos, carburos cementados y vidrio.

2.7. Fuerzas en el proceso de esmerilado

En el proceso de esmerilado es fundamental conocer las fuerzas para:

- Determinar los requerimientos de potencia
- Diseño de máquinas junto a los soportes y dispositivos de sujeción.
- Determinar las deflexiones que puede sufrir la pieza de trabajo y la máquina herramienta. Deflexiones afectan de manera adversa la precisión dimensional y es crítico en un esmerilado de precisión.

Se supone que la fuerza de corte en el grano es proporcional al área transversal de la viruta sin deformación, se pude demostrar que la fuerza del grano, la que tiene dirección tangencial al disco, es proporcional a las variables del proceso.

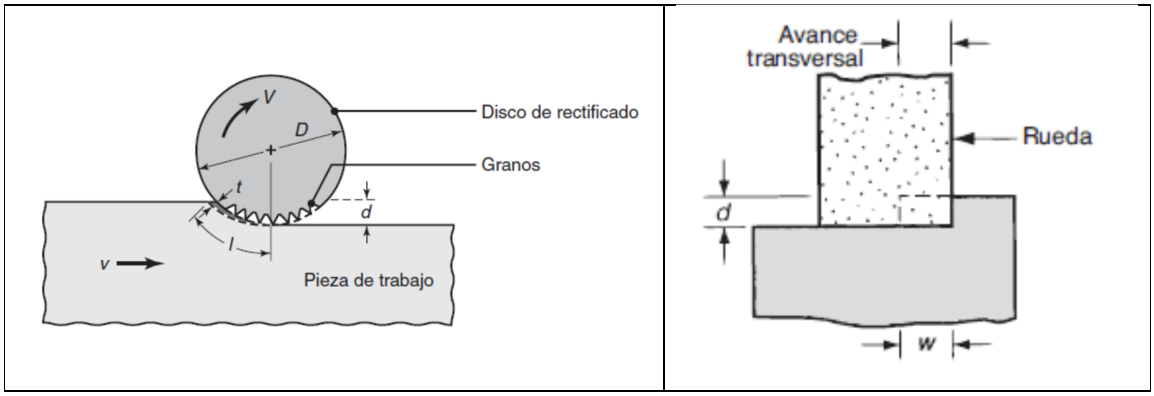


Imagen 3.3 esquema muestra las variables del proceso de esmerilado

$$fuerza\ de\ corte\ en\ el\ grano\ \propto \left(\frac{v}{V}\sqrt{\frac{d}{D}}\right) \tag{3.1}$$

En donde:

v: velocidad de avance de la pieza

V: velocidad de giro de la rueda

d: profundidad de corte

D : diámetro de la rueda o muela.

2.8. Energía especifica u

La energía específica para el esmerilado se define como la energía necesaria para la remoción de una unidad volumétrica de material. En esta se considera la energía requerida para las siguientes acciones:

- Formación de la viruta
- Surcado
- Fricción, causada por el rozamiento del grano a lo largo de la superficie de la pieza de trabajo.

Después de cierto uso, los granos de la periferia del disco se desgastan y desarrollan una cara de desgaste. Esta roza continuamente a lo largo de la superficie de trabajo, disipando energía debido a la fricción y produciendo que la operación de esmerilado sea menos eficaz.

Tabla 3.2. comparación entre requerimiento de energía específica para el mecanizado convencional y el mecanizado abrasivo. Es notable que el requerimiento de energía específica para el proceso de esmerilado es mucho mayor.

Material	Dureza	u Esmerilado [W*s/mm^3]	u Maquinado [W*s/mm^3]
Aluminio	150 [HB]	7-27	0.4-1
Hierro fundido	215 [HB]	12-60	1.1-5.4
Acero bajo carbono	110 [HB]	14-68	2-9
Aleación titanio	300 [HB]	16-55	2.5-9
Acero herramientas	67 [HRC]	18-62	-

Nótese que los niveles de energía por unidad de volumen son mucho mayores que en operaciones de maquinado convencional. La diferencia en estos niveles de energía se ha atribuido a factores como:

- Presencia de cara de desgaste
- Alto ángulo de ataque negativo de grano, esto requiere mayor cantidad de energía
- Contribución del tamaño, cuanto más pequeña es la viruta, más alta será la energía requerida para producirla.

2.9. Fuerzas en esmerilado de superficies

Es necesario conocer las fuerzas involucradas en la operación para así calcular los requerimientos de potencia y poder elegir las herramientas necesarias para poder lograrlo.

La fuerza de empuje normal a la superficie F_N puede ser medida directamente mediante un transductor electrónico, o podrá ser estimado como un 30% mayor a la fuerza de corte. La fuerza de corte F_c podrá ser determinada a partir de información de la operación. Para calcularla será necesario conocer:

- Acerca del material:
  - Energía específica para rectificado (u)
- Acerca de la operación:
  - Diámetro del disco (D)
  - Velocidad angular (N) $[RPM]$

- Ancho de corte (w)
- Profundidad de corte (d)
- Avance (v)

A partir de la información anterior es posible determinar la fuerza de corte F_c de la siguiente forma:

i. Determinar velocidad remoción de material (MRR)

$$MRR = d * w * v \tag{3.2}$$

ii. Determinar Potencia consumida:

$$potencia = u * MRR \tag{3.3}$$

iii. Ya que

$$potencia = T * \omega \tag{3.4}$$

$$\omega = 2 * \pi * N \tag{3.5}$$

$$T = F_c * \frac{D}{2} \tag{3.6}$$

Al reemplazar las ecuaciones (3.4) y (3.5) en (3.6), y se puede obtener la magnitud de a fuerza de corte F_c como:

$$F_c = \frac{Potencia}{D*\pi*N} \tag{3.7}$$

Ya que consideramos que F_N es un 30% mayor que F_c

$$F_N = 1{,}3 * \frac{Potencia}{D*\pi*N} \tag{3.8}$$

2.10. Temperatura en el proceso de esmerilado

Debido a diversos factores tales como el efecto de tamaño de grano, ángulo de ataque altamente negativo y la fricción de los granos abrasivos contra la superficie de trabajo, es que durante el proceso de mecanizado se libera gran cantidad de energía en forma de calor. Al igual que en operaciones de mecanizado de alta velocidad, al trabajar con una alta velocidad de corte, las virutas se llevan consigo la mayor parte del calor generado en la operación. Los máximos de temperatura durante la operación de mecanizado abrasivo pueden alcanzar los 1600 [º C].

Algunos de los efectos negativos del incremento de temperatura son:

- Un gran aumento en la temperatura local puede afectar de manera adversa las propiedades superficiales del material, incluyendo cambios metalúrgicos tales como revenido y ablandamiento.
- El aumento de la temperatura puede generar esfuerzos residuales en la pieza de trabajo.
- Gradientes de temperatura en la pieza de trabajo provocan distorsión debido a la dilatación y contracción térmica.

Es importante entender los parámetros que tienen influencia en el incremento de la temperatura de la superficie de trabajo. El aumento de la temperatura se relaciona con las variables del proceso de forma:

$$aumento\ de\ T\ \propto\ D^{1/4} d^{3/4} \left(\frac{V}{v}\right)^{1/2} \tag{3.9}$$

La implicancia de esta relación es que el incremento de temperatura puede ser atenuado al realizar acciones tales como: disminuir la profundidad de corte d, el cual es el factor de mayor ponderación en el incremento de temperatura; disminuir el diámetro del disco D; y disminuir la velocidad de rotación de la piedra V.

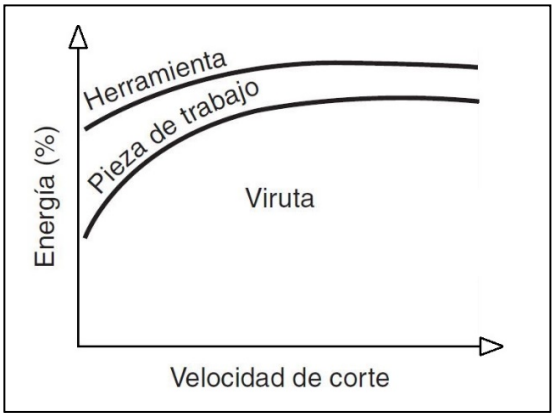


Imagen 9 proporción del calor generado transferido a herramienta, pieza de trabajo y viruta, en función de la velocidad de corte.

En el grafico anterior se muestra que para cuando aumenta la velocidad de corte, la mayor porción de calor producido es llevado por las virutas, mientras que solo una pequeña porción del calor se transfiere a la superficie y herramienta. Por lo tanto, a pesar de que al aumentar

la velocidad de rotación de la piedra se genera un aumento de la temperatura, es en este régimen de alta velocidad en el cual se logra disipar la mayor porción del calor en la viruta.

2.11. Desgaste de piedras abrasivas

El desgaste de los discos y piedras afecta de manera adversa la forma y precisión dimensional de las superficies rectificadas. Similar al desgaste de las herramientas de corte, el desgaste de las piedras abrasivas es provocado por tres mecanismos, estos son: desgaste por rozamiento del grano, fractura del grano y fractura del aglutinante.

- Desgaste por rozamiento. Las aristas de corte de un grano que originalmente es puntiagudo se desafilan y desarrollan una cara de desgaste. El desgaste es provocado por la interacción del grano con el material de la pieza de trabajo, que incluye reacciones físicas y químicas. Estas reacciones son complejas y comprenden fenómenos de difusión, degradación química o descomposición del grano, fractura a escala microscópica, deformación plástica y fusión.

  Por lo tanto, la selección del tipo de abrasivo para el desgaste se basa en la reactividad del grano con la pieza de trabajo y sus propiedades mecánicas relativas, tales como dureza y tenacidad.
- Fractura del grano. Los granos abrasivos son duros y quebradizos. Lo ideal es que los granos se fracturen o fragmenten a una velocidad moderada, de manera que nuevas aristas afiladas de corte se produzcan continuamente durante el rectificado.

  La selección del tipo y tamaño de grano para una aplicación en particular depende de la velocidad de desgaste por rozamiento del grano. La combinación de un alto desgaste por fricción y baja friabilidad del grano provoca el desarrollo de caras de desgaste. De esta forma el esmerilado se vuelve ineficaz y es probable que se produzca daño en la superficie.
- Fractura del aglutinante. La resistencia del aglutinante, o grado de este, es un parámetro significativo en el esmerilado. Si el aglutinante es demasiado fuerte los granos desafilados no se pueden desalojar. Esto evita que otros granos afilados a lo largo de la circunferencia del disco de rectificado establezcan contacto con la pieza de trabajo para retirar virutas, por lo que el proceso se vuelve ineficaz. Por otro lado, si el aglutinante es demasiado débil, los granos se sueltan fácilmente y aumenta la

velocidad de desgaste del disco, en este caso será difícil mantener la precisión dimensional.

Como regla general se recomiendan aglutinantes más blandos para materiales más duros, como también para reducir esfuerzos residuales y el daño térmico en la pieza de trabajo. Los discos y piedras de mayor grado son usados en materiales más blandos y para retirar grandes cantidades de material a alta velocidad.

El desgaste de la rueda puede ser esquematizado en una gráfica, en la cual muestra el efecto combinado de los tres mecanismos de desgaste mencionados anteriormente.

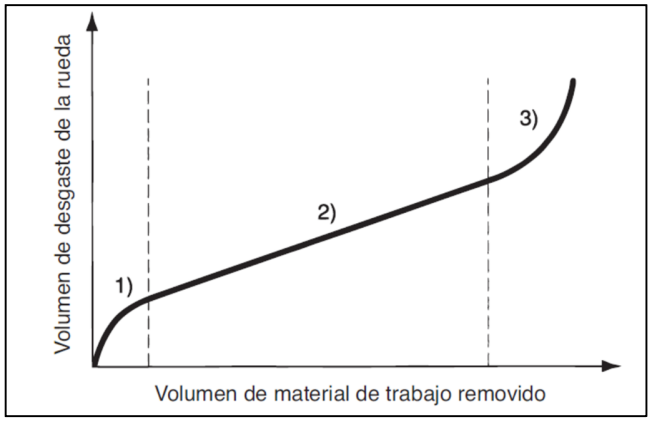


Imagen 3.5 relación entre el volumen de desgaste de la rueda y el volumen de material removido. En la zona 2 se produce una relación lineal entre ambos volúmenes de desgaste, por lo que se puede hacer análisis de esta relación para obtener la relación de rectificado. La cual indica el volumen de material removido por cada unidad volumétrica de desgaste de la piedra.

Se aprecian tres secciones características en la curva de desgaste, en la primera sección, los granos activos se encuentran afilados, se produce un desgaste acelerado producto de la numerosa fractura de los filos. Luego en la segunda sección, se genera una relación lineal entre el volumen de desgaste de la herramienta y el volumen de material removido, esta sección se caracteriza por el desarrollo de una cara de desgaste que provoca incremento en la fuerza sobre los granos y del desgaste por rozamiento. Finalmente, en la tercera sección de la curva, los granos ya se encuentran embotados, por lo su capacidad de corte es reducida, disminuyendo la tasa de remoción de material.

Puesto que se produce una relación lineal entre ambos volúmenes de desgaste, al analizar el reciproco de la pendiente de la recta generada, se puede determinar la razón de desgaste de

la piedra versus la cantidad de material retirado de la pieza de trabajo mediante la relación de rectificado G, la que está definida como:

$$G = \frac{volumen\ de\ material\ removido}{volumen\ de\ desgaste\ de\ piedra} \tag{3.10}$$

Esta relación indica el volumen de material removido por unidad volumétrica de desgaste de la piedra. En la práctica la magnitud de la relación de rectificado varía ampliamente, y va desde 2 hasta 200 y más dependiendo del tipo de piedra, el material de la pieza de trabajo y los parámetros del proceso tales como la profundidad de corte y las velocidades de la pieza y herramienta.

La relación de esmerilado incrementa cuando aumenta la velocidad de la rueda, la razón es que el tamaño de viruta disminuye al aumentar la velocidad, por lo que la cantidad de fracturas de grano se reduce.

A pesar de lo anterior no siempre es deseable utilizar la más alta relación de rectificado, pues cuando la velocidad de la rueda aumenta demasiado, se incrementa el desgaste por fricción y con ello la temperatura.

2.12. Riesgos asociados a la operación de esmerilado

El principal riesgo asociado a esta operación recae en la rotura de la piedra abrasiva, lo que puede ocasionar daños al operador. También debe tenerse en cuenta el riesgo de inhalación del material particulado producido durante la operación. Los riesgos en la operación de esmerilado residen en situaciones como un montaje defectuoso de la piedra o disco, velocidades tangenciales demasiado altas, uso de piedras agrietadas o deterioradas, carga excesiva ejercida sobre la piedra, la que conduce al bloqueo de esta. Como las piedras abrasivas pueden romperse, su manipulación y almacenamiento debe realizarse cuidadosamente teniendo precauciones tales como mantenerlas siempre en un lugar seco y evitar temperaturas extremas, se debe escoger un correcto grano abrasivo, para así evitar que el operario ejerza presión demasiado alta sobre la piedra, lo que podría provocar su ruptura. También producto de interferencia entre la pieza de trabajo y la piedra podría provocar que esta quede atascada, lo que provoca el giro de la herramienta y con ello daños al operario.

3. Robótica industrial

En el contexto mundial la robótica industrial es parte fundamental de ésta 4ª Revolución Industrial en la que estamos inmersos, pues la aplicación de esta tecnología incrementa la productividad de las plantas, reduce los costos operacionales y mejora la calidad del producto final.

3.1. Definición

Un robot industrial es definido según la ISO 8373:2012 como un manipulador de tres o más ejes, que cuenta con control automático, es reprogramable y multipropósito. El cual podrá estar posicionado fijo en un lugar o encontrarse en movimiento para desarrollar tareas industriales automatizada. Los términos que definen las características del robot son explicados a continuación:

- Reprogramable: diseñado de forma que tanto los movimientos de los ejes, como otros movimientos auxiliares puedan ser cambiados sin realizar intervención física en el robot.
- Multipropósito: tiene capacidad para adaptarse a diferentes aplicaciones con modificaciones físicas.
- Control automático: no requiere de control directo para la realizar movimientos

3.2. Estructura mecánica y clasificación

Un robot industrial está constituido por una serie de elementos rígidos denominados eslabones o miembros, los que se encuentran conectados entre sí mediante articulaciones.

El conjunto de eslabones unidos mediante articulaciones conforma una cadena cinemática abierta que va desde la base robot hasta la muñeca, en donde se encuentra ubicada la herramienta o actuador final.

Las articulaciones podrán ser de dos tipos, lineales para cuando un eslabón se mueve a lo largo de un eje perteneciente al eslabón anterior de la cadena, o de tipo rotacional cuando el movimiento del eslabón es en torno a un eje del eslabón anterior.

Los principales parámetros que caracterizan a los robots industriales son:

- Numero de grados de libertad: Se denomina grado de libertad a cada una de las coordenadas independientes necesarias para describir de posición y orientación del actuador final. El número de grados de libertad generalmente coincide con el número de articulaciones de la cadena cinemática, pero existen articulaciones con más de un grado de libertad.
- Espacio o volumen de trabajo: Espacio conformado por conjunto de puntos en donde robot industrial tiene acceso.
- Capacidad de carga: Máxima carga que puede ser transportada por el manipulador sin que se afecte al desarrollo de sus movimientos.

A continuación, se hace revisión de las diferentes morfologías de robots industriales actuales.

- Robot lineal o cartesiano

  Llamado así por que sus miembros se encuentran montados sobre tres ejes lineales y ortogonales entre sí, haciendo que este robot sea de los más sencillos de controlar.

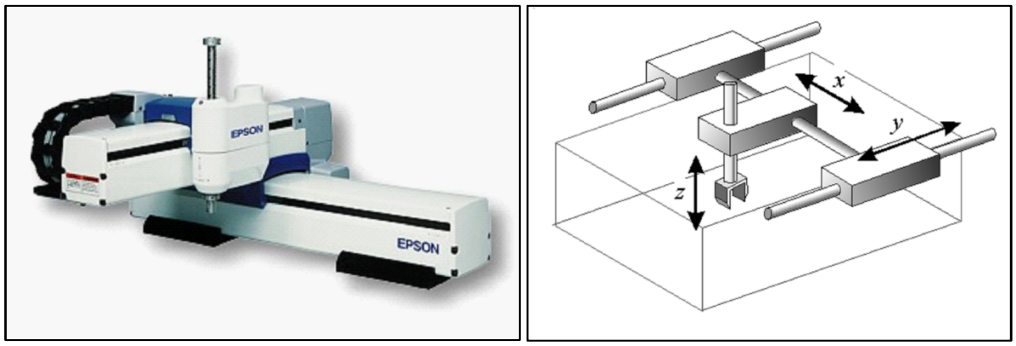


Imagen 4.110 morfología de robot cartesiano. en la imagen de la izquierda se presenta el volumen de trabajo de este.

- Robots *Scara*

  De sus siglas en inglés *Selective Compliant Assembly Robot Arm*. Tiene como característica contar con dos o tres articulaciones rotacionales montadas sobre ejes verticales y un eje de desplazamiento lineal.

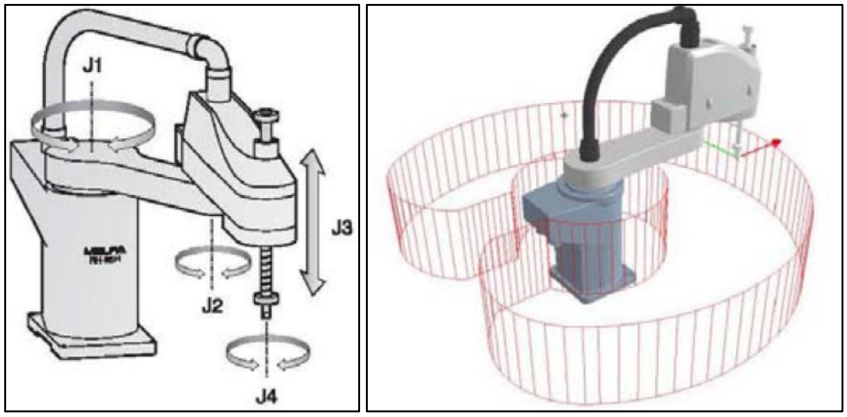


Imagen 4.2 morfología de robot scara. en la imagen de la izquierda se presenta el volumen de trabajo de este

- Robots articulados

  También se les denomina antropomórficos debido a las similitudes entre su estructura y el brazo humano. Todas sus articulaciones son de tipo rotacional y logran una buena cobertura del área de trabajo.

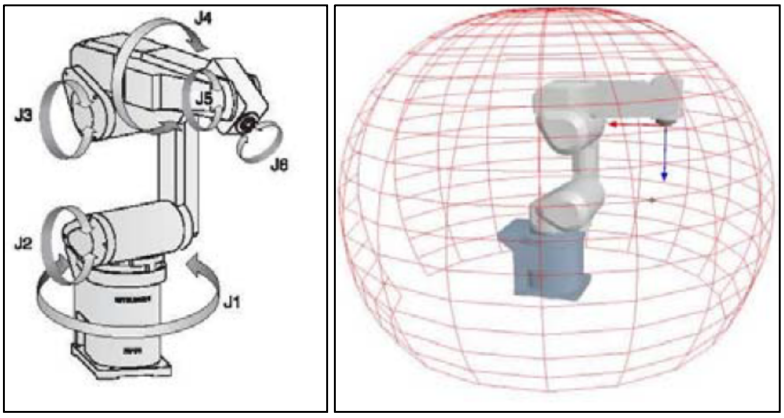


Imagen 4.3 la imagen de la izquierda esquematiza el movimiento de los ejes. A la derecha se presenta el volumen de trabajo de este

- Robots paralelos

  Estos se caracterizan por tener sus elementos móviles montados de forma paralela y no en serie como el resto de los robots industriales. Sus elementos móviles cuentan con articulaciones del tipo rotacional. La ventaja que se tiene es que se elimina el error acumulado de posicionamiento en cada eje.

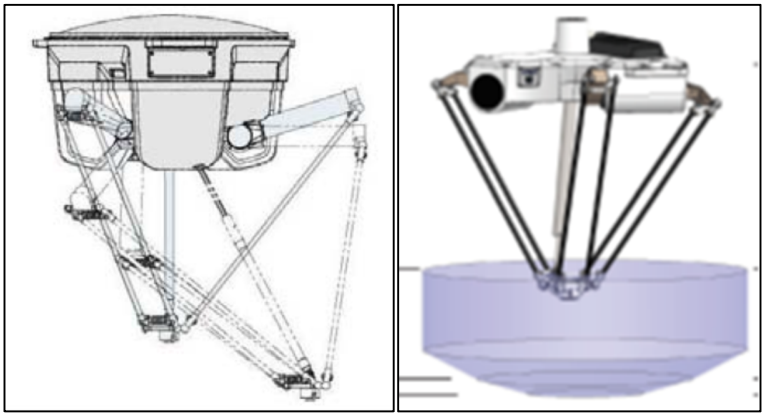


Imagen 4.411 morfología de robot paralelo. en la imagen de la izquierda se presenta el volumen de trabajo de este

- Robots cilíndricos

  La primera articulación es de tipo rotacional, produciendo por consiguiente rotación en torno a la base; en tanto que la segunda y tercera articulación son lineales.

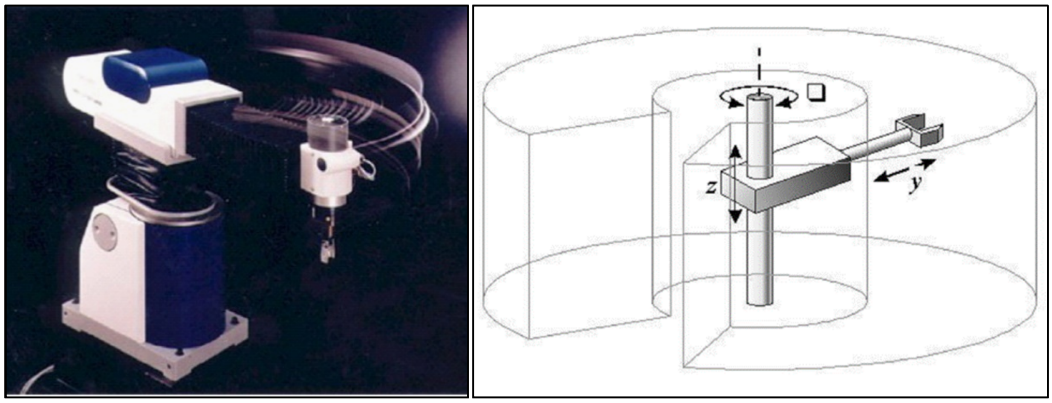


Imagen 4.5 12morfología de robot cilíndrico. en la imagen de la izquierda se presenta el volumen de trabajo de este

3.3. Sistema motor del robot industrial

Entre los robots industriales que se encuentran actualmente en el mercado se reconocen tres diferentes sistemas de accionamiento, pudiendo este ser del tipo hidráulico, eléctrico o neumático.

El sistema hidráulico otorga al robot mayor potencia y la posibilidad de trabajar a mayor velocidad. Como desventaja se tiene la ocurrencia de fugas de fluido, que merman la potencia y precisión en los movimientos del robot.

Sistemas neumáticos suelen ser usados en robots de pequeños de poca capacidad de carga, en donde se necesite de manipular objetos por un corto tiempo. Al igual que los sistemas hidráulicos, existe la posibilidad de falla por fugas de aire presurizado.

Por último, los sistemas eléctricos tienen la ventaja de la exactitud y repetibilidad de sus movimientos, pero al costo de trabajar a menor velocidad y contar de menor potencia. El accionamiento es a partir de motores paso a paso o servomotores de corriente continua, los que entregan potencia a un tren de engranajes y/o correas para generar el movimiento.



Imagen 4.6 vista interior de brazo robótico KUKA, se muestra sistema de correas para la trasmisión de movimiento

3.4. Aplicaciones de los robots industriales

El uso de robots industriales se ha generalizado en todo el mundo y con ello se ha revolucionado la industria. En la actualidad diversos rubros aprovechan este recurso tecnológico y lo incorporan en sus procesos productivos, entre ellos se encuentran la industria del *retail*, el procesamiento de alimentos, manufactura electrónica, minería, etc. Pero sin duda la industria automotriz es la actividad que ha logrado sacar mayor provecho de la tecnología de brazos robóticos industriales. A lo largo de las líneas de montaje los brazos robóticos realizan diversas tareas tales como: soldadura al arco, soldadura por resistencia, manipulación de materiales, pintura en spray, ensamble de componentes, corte, esmerilado, pulido, aplicación de pegamento, inspección, testeo y otras.

El uso de brazos robóticos industriales también permite realizar trabajo en múltiples entornos incluyendo aquellos en donde la salud laboral de los trabajadores esté en riesgo, como por ejemplo en la industria de la fundición.

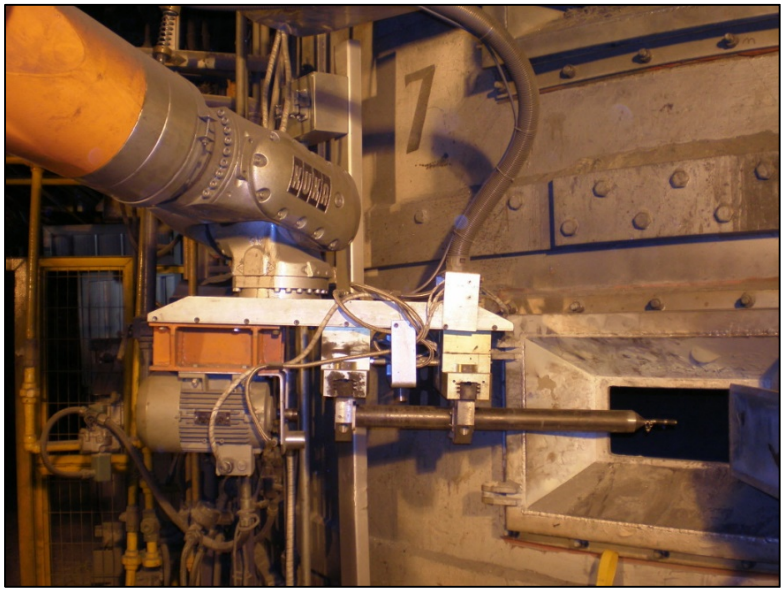


Imagen 4.7 brazo robótico con cabezal diseñado para la limpieza de horno tostación molibdeno. Codelco división Chuquicamata

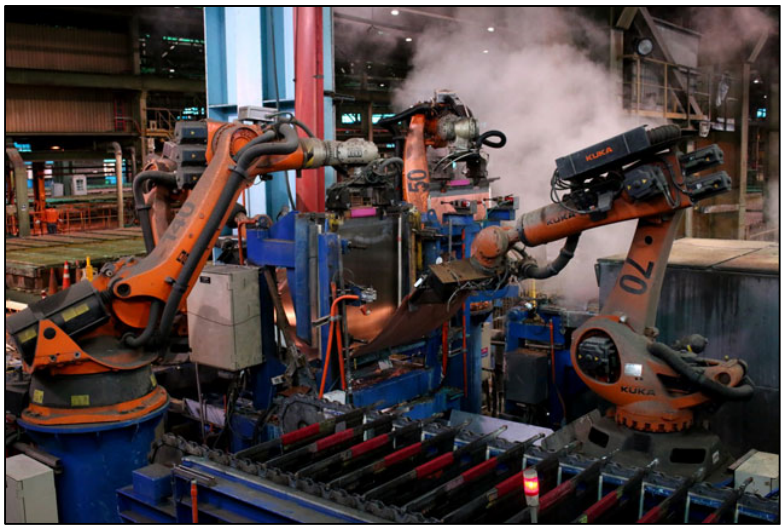


Imagen 4.8 conjuntos de brazos robóticos utilizados en tarea de reposición de placas base en el proceso de obtención de cobre electrolítico. Codelco división Radomiro Tomic

3.5. Implementación de brazo robótico industrial

Si se desea hacer la implementación de brazos robóticos dentro de un proceso, primero se debe realizar una caracterización y evaluación de este.

Será factible implementar un sistema robótico industrial cuando el proceso cumpla con características del tipo:

- Las tareas son repetitivas.
- El trabajo se realiza en una estación fija y bien definida.
- Las condiciones de trabajo son desfavorables o peligrosas para el operario.
- El manejo de materiales y/o herramientas es dificultoso para el operador.

Algunos de los beneficios que se obtienen al implementar un brazo robótico industrial son:

- Mejoramiento de la calidad. Se genera una mejora continua asociada a la gestión de funciones internas del proceso tal como lo es la gestión de R.R.H.H. y la gestión de materiales. Con el objetivo de mejorar la satisfacción del cliente.
- Optimización del proceso productivo. Se logra un mejor control de los procesos, las tareas están estandarizadas por lo que el tiempo de trabajo está bien definido.
- Mejoramiento en la seguridad y salud ocupacional. Se desplaza al operario de trabajos rutinarios, fatigosos y que puedan poner en riesgo su salud.
- Incremento de la productividad. Se mejora la relación entre los inputs y outputs en la producción. Se disminuye la tasa de rechazos.
- Ahorro en materia prima y energía. Al estandarizar las tareas se logra un mejor manejo de los recursos involucrados.

3.6. La programación del robot industrial.

La tarea primordial del programador del robot industrial es lograr el control de los movimientos de este para así cumplir con la tarea encomendada.

A continuación, se hace una revisión de los métodos de programación de un brazo robótico industrial.

3.6.1. Programación Online o convencional

La principal característica de este modo de programación es que requiere de la presencia del operador junto al brazo robótico en la celda de trabajo para realizar la programación de los movimientos. En la actualidad se utilizan dos principales métodos para la programación

Online, el método de enseñanza "*Teach In Programming*" y el método de enseñanza vía demostración o "*Lead Throught Programming*".

- 4.6.1.1. Método de enseñanza "*Teach In Programming*".

Para realizar este tipo de programación el operario utiliza el *Teach pendant* o HMI del brazo robótico, que es la interfaz entre el operario y la máquina. El HMI podrá ser una pantalla táctil, teclado alfanumérico, joystick u otra interfaz computacional. Ya que el operario se encuentra dentro del área de trabajo, se modera la velocidad del brazo robótico para disminuir el riesgo de accidentes.

En este método de programación el operario enseña al robot la trayectoria a seguir paso a paso o punto a punto, y especificando el tipo de movimiento a realizar entre ellos. El controlador del brazo robótico guarda registro de la posición de cada punto enseñado, para luego encadenar los movimientos y conseguir que el TCP siga la trayectoria deseada. Una vez que la secuencia de trabajo es cargada al ordenador del brazo robótico, el HMI puede ser desconectado y se podrá ejecutarla la rutina a velocidad máxima si es requerido.

Se estima que actualmente el 90% de los robots industriales son programados usando este método.

- 4.6.1.2. Método de enseñanza vía demostración o "*Lead Throught Programming*"

En este método de programación el operario enseña de manera directa al brazo robótico la trayectoria del TCP. Para realizar esto, se debe actuar de manera manual ejerciendo fuerza sobre el TCP de manera de guiarlo a través de la trayectoria deseada. De esta forma el controlador del brazo robótico "aprenderá" y guardará esta trayectoria para luego replicarla. Este método de programación resulta más fácil que el método de "*Teach in*" pues es más intuitivo, requiere de menos habilidades de programación y tiempo para lograrlo. Ya que se trata de programación de trayectorias continuas, es que se recomienda este método de programación para trabajos tales como pintura y aplicaciones de soldadura.

Es necesaria la incorporación de un sensor de fuerza/torque en la muñeca del robot para lograr mover manualmente el TCP y hacer registro de la trayectoria.

La desventaja de este método de programación es la difícil edición del código para realizar correcciones, pues se ha programado un patrón continuo y para la modificación puede ser resultar más fácil el trazado de uno nuevo.

3.6.2. Programación Offline

La simulación robótica y la programación visual asistida por software son temas de gran impacto en los sistemas de manipulación robótica y en el mercado industrial.

El método de programación *offline* emplea modelos tridimensionales tanto de la superficie como del entorno de trabajo y genera la trayectoria del TCP mediante el trazado de líneas sobre la superficie de trabajo. Para el control de la trayectoria es que se simulan los movimientos del robot, así es posible detectar situaciones no deseadas, tales como colisiones, singularidades e incapacidad de abarcar completamente el área de trabajo.

El principal beneficio de la programación *offline* es la reducción de costos asociados a la programación del robot, pues solo se tiene el costo asociado a la generación de la simulación. De esta forma es posible generar diferentes alternativas de solución sin la necesidad involucrar costos de puesta en marcha. Al usar este método de programación también es posible realizar una optimización del *layout* de la celda de trabajo, pues los efectos de las modificaciones son apreciables de manera inmediata en la simulación. Por último, puesto que no es necesaria la presencia del programador en la celda de trabajo, es que se evita su exposición a potenciales situaciones de riesgo.

El código obtenido es igual al que podría ser obtenido mediante la programación *online*, con la ventaja de incorporar gran cantidad de información en un corto periodo de tiempo, logrando trazar fácilmente trayectorias de alta complejidad.

En el mercado se pueden encontrar diferentes alternativas de software para el desarrollo de programación *offline*, algunos desarrollados para aplicaciones específicas como soldadura, y otros con potencial de lograr multifuncionalidad del brazo robótico. Entre ellos se encuentran:

- *Delfoi Robotics OLP*
- *RoboDK*
- *RobotMaster*

- *Octopuz*
- *Siemens Tecnomatix*
- *Kuka Sim Pro*
- *Kuka Prc*
- *KCONG (Kawasaki Common Offline NC data Generator)*

3.7. Grasshopper y KUKA|prc

Grasshopper es una herramienta de modelamiento algorítmico integrada como *plug-in* en *Rhinoceros* 3D. Permite diseñar algoritmos de manera intuitiva, por lo que no es necesario el aprendizaje de un nuevo lenguaje de programación. Esta es una herramienta de diseño paramétrico, lo que otorga mayor flexibilidad y facilidad en la edición del algoritmo, haciendo más eficiente el proceso de iteración para encontrar la mejor solución a un requerimiento.

Rhinoceros 3D es una herramienta de computacional para modelado 3D que se especializa en el modelado libre mediante NURBS (*"non uniform rational B-spline").* Las entidades NURBS están descritas por un modelo matemático que describe con precisión su forma.El modelamiento de estas se realiza mediante la manipulación de puntos característicos, en lugar de la unión de polígonos.

KUKA|prc es una herramienta de control paramétrico para manipuladores robóticos industriales que permite la programación *offline* mediante el modelamiento de algoritmos en *Grasshopper* y la simulación de los movimientos en un entorno visual.

Al estar *Grasshopper* y KUKA|prc trabajando dentro de *Rhinoceros*, es que integra gran parte de sus comandos tomando ventaja de sus funcionalidades.

4.7.1 ¿Cómo se trabaja en *Grasshopper*?

El trabajo en esta plataforma se basa en la manipulación de información perteneciente a geometrías, las que pueden estar referenciadas desde el entorno de *Rhinoceros*, como también pueden ser propias de *Grasshopper*.

El algoritmo generado consiste en una secuencia de componentes enlazados por donde se procesa un flujo de información. Estos componentes son insertados en el área de trabajo o *canvas*. Estos tienen entradas y salidas de datos, en las entradas son ingresados parámetros

que contienen información, pudiendo ser estos datos persistentes creados por el usuario o heredados como el resultado de salida de otro componente. A la salida del componente se tiene el resultado de la transformación realizada. Los componentes contienen un *script* de acciones y funcionan a modo de caja negra para el usuario, pues solo se conocen la función del componente, el parámetro de entrada y el resultado de salida.

Los componentes encadenados forman un conjunto de operaciones sistemáticas que permiten obtener un resultado final para un parámetro inicial ingresado, el que podrán ser modificado con facilidad otorgando una gran flexibilidad frente a la manipulación de grandes cantidades de información.

Para lograr representar una idea a *Grasshopper* no solo basta con conocer al programa y sus comandos, sino que también es necesario lograr traducir la idea a un lenguaje de lógico, para luego pasar a un lenguaje que *Grasshopper* pueda entender.

Gráfico 4.1 Grasshopper es una excelente herramienta para llevar a cabo proyectos basados en una gran cantidad de información, geometrías o múltiples variables que sean conocidas, pero no es una buena herramienta para manejar procesos intuitivos y difusos, los que tienen dificultad de ser traducidos a un lenguaje lógico.



3.8. Movimientos del brazo robótico

Los brazos robóticos industriales funcionan de manera similar a equipos de control numérico, por lo que el primer paso para la programación es la planeación y generación de la trayectoria a seguir por la herramienta o *toolpath*, para luego traducir esta información a un lenguaje de instrucciones de movimientos que sea entendible por la máquina.

Las instrucciones de movimientos pueden ser clasificadas en comandos para lograr movimientos punto a punto PTP (*point to point*) y comandos para seguir patrones continuos de movimiento CP (*continuous path*). El punto en común de ambos modos de instrucción es que el movimiento se realiza desde la posición actual hasta una nueva posición, por lo que

las instrucciones de movimiento generalmente requieren solo de la especificación de la posición final para el TCP.

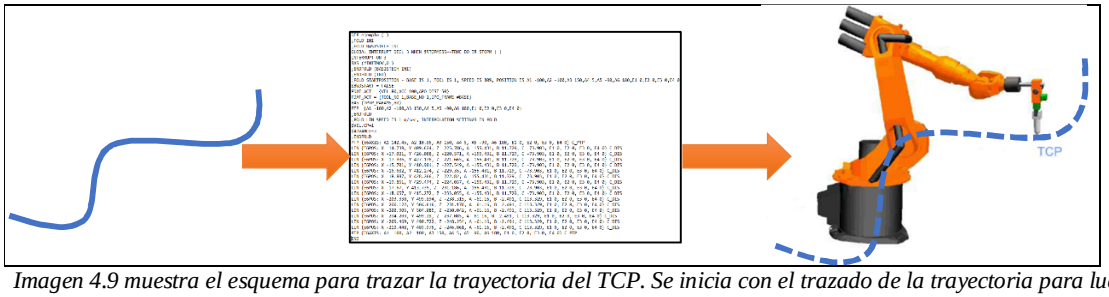


Imagen 4.9 muestra el esquema para trazar la trayectoria del TCP. Se inicia con el trazado de la trayectoria para luego traducir esta información a un lenguaje comprensible por el brazo robótico

3.8.1. Movimientos CP

Al usar la programación de tipo CP, la punta de la herramienta describirá el patrón ordenado en la programación, pudiendo ser este una línea recta o una sección circular. En el caso de los movimientos lineales LIN, el controlador del brazo robótico determina una recta desde la posición actual, o último punto programado, hasta el nuevo punto de destino. Mientras que para realizar movimientos circulares CIRC, se requiere de tres puntos que deben ser diferentes entre sí y no colineales, siendo estos la posición actual, posición de destino y una posición auxiliar intermedia.

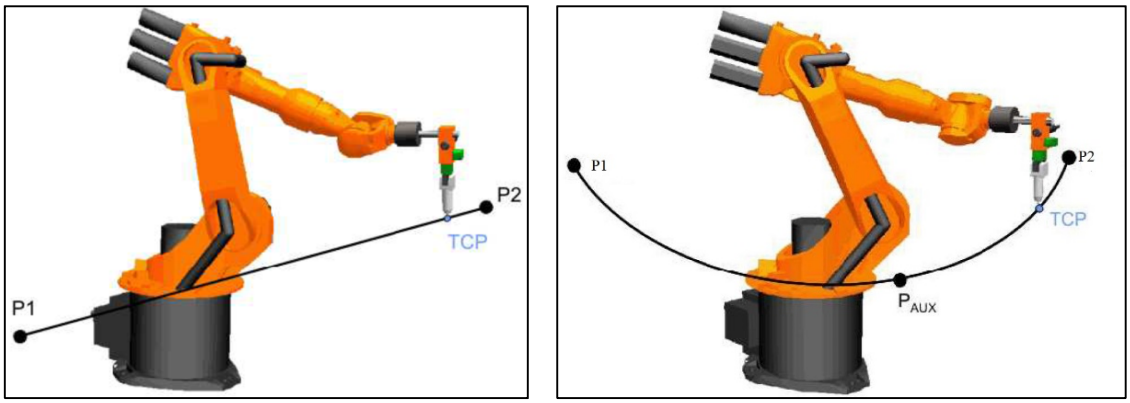


Imagen 4.1013 a la izquierda se muestra el desarrollo de un movimiento lineal, en donde el controlador determina una recta entre los puntos P1 y P2. Mientras que a la derecha se muestra el desarrollo de un movimiento circular, el controlador requiere del ingreso de un punto auxiliar para generar el radio de curvatura.

3.8.2. Movimientos PTP

Al usar el modo PTP, la trayectoria del TCP dependerá del sistema cinético del robot, ya que el controlador de este determina la diferencia angular necesaria en cada eje para alcanzar la posición indicada. El movimiento de los ejes ocurre de manera sincronizada, de forma que

todos ellos inician y finalizan su movimiento en el mismo instante. En este modo de movimiento, el controlador del brazo robótico no tiene preocupación sobre la trayectoria que cursa el TCP en el espacio, sino que de llegar al punto de destino a través de la trayectoria más rápida. Esta trayectoria escogida por el controlador no implica que sea la más corta, sino que es en la cual se logra un mejor desarrollo del movimiento de los ejes. Esto se debe a que las articulaciones de los brazos robóticos son de tipo rotacional, y resulta más fácil trazar una trayectoria curva a una recta. Es por lo esto que los movimientos de tipo PTP son más rápidos en comparación a los de tipo CP, pero al costo de una trayectoria impredecibles entre los puntos de inicio y fin.

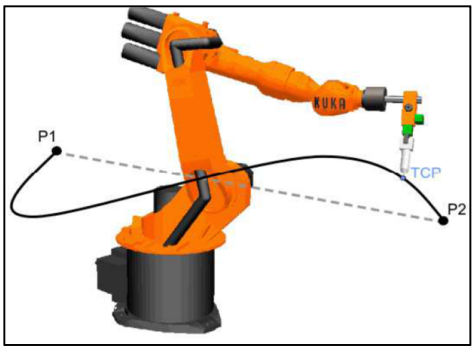
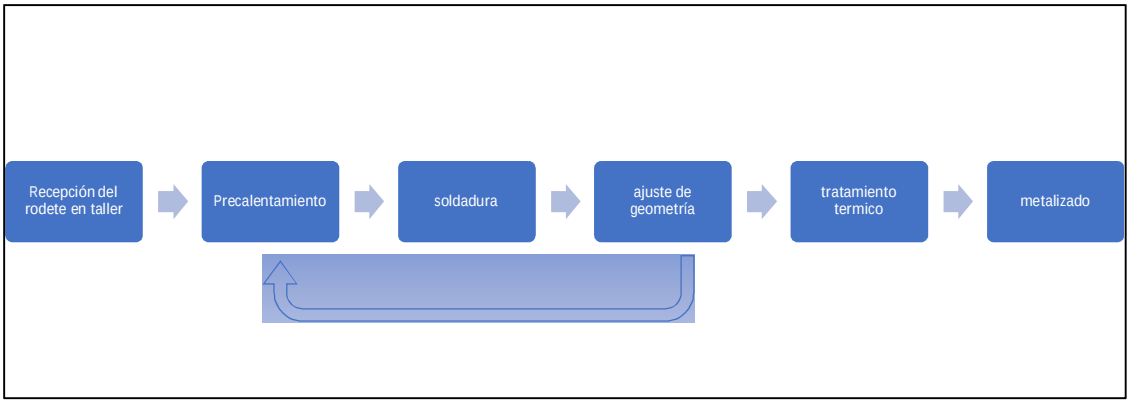


Imagen 4.11 en un movimiento PTP el controlador del brazo robótico determina la mejor trayectoria para llegar desde P1 a P2.

4. Análisis del actual proceso de recuperación

La empresa dueña del rodete externaliza el servicio de recuperación de los rodetes Pelton, entregando pautas técnicas en donde se describen de manera detallada las actividades del proceso. El contrato se realiza posterior a un periodo de licitación. Se contempla un tiempo máximo de 4,5 meses para la recuperación de los rodetes, siendo este periodo de tiempo un factor crítico al momento de la elección de las ofertas de reparación.

Gráfico 5.1 muestra el proceso actual de recuperación de los rodetes tipo Pelton. Si se cometen errores durante la etapa de mecanizado de la superficie se debe retornar a la fase preparatoria de soldadura. Por lo que cometer errores tiene un gran impacto en el costo de la reparación.



El proceso inicia con la admisión del rodete en taller. Se debe realizar un mapeo de los defectos existentes, control dimensional de la geometría actual, pesaje y ensayos no destructivos, de manera de determinar la condición actual del componente.

Una vez realizado el control de admisión se realiza un “saneado” de la superficie, proceso en donde mediante herramientas de esmerilado manual, se desbastan bordes pronunciados en las zonas dañadas para dejar la superficie en condición para la operación de soldadura.

El relleno de las perforaciones en la superficie se realiza mediante aporte de soldadura SMAW. El precalentamiento previo a la soldadura se realiza mediante quemadores de gas de tipo butano-propano. La temperatura es monitoreada usando termocuplas de contacto soldadas en la superficie exterior del capacho.

Durante la fase de aporte de soldadura se debe mantener al rodete en un rango de temperatura entre 190 [ºC] y 300 [ºC], por lo que es ingresado a un horno con calefactores eléctricos y paredes aislantes.

El proceso de soldadura se realiza siguiendo una pauta que indica el orden de los capachos a trabajar, de modo de evitar distorsiones por efecto térmico. Ya que se utiliza un electrodo recubierto, se debe tener especial cuidado en la limpieza entre pasadas de soldadura. Se debe eliminar prolijamente todo residuo de escoria para evitar la ocurrencia de inclusiones de agentes externos en la siguiente pasada de soldadura.

Cuando se requiere aportar soldadura en un área muy extensa, debe realizar desde zonas diametralmente opuestas, para evitar dilataciones no uniformes que conducen a deformaciones permanentes.

Para la etapa de aporte de soldadura se recomienda la siguiente secuencia de trabajo:

1. Relleno de fondos
2. Relleno de paredes externas
3. Reconstrucción del partidor
4. Reconstrucción de bocas

Finalizado el aporte de soldadura se debe realizar la recuperación del perfil de la superficie. Debido a la alta dureza del material base es que se realiza mecanizado abrasivo del exceso de soldadura usando herramientas manuales. El operario de la herramienta tiene como objetivo mecanizar la superficie hasta hacerla coincidir con plantillas de control.

el cual deberá entregar los siguientes grados de calidad superficial.

Tabla 5.1. se especifica calidad superficial esperada luego del proceso de esmerilado.

CALIDAD SUPERFICIAL		**UBICACIÓN**
GRADO	**Ra**	
N6	0,8 µm	Partidor y raíz
N7	1,6 µm	Fondo y costados laterales
N6	0,8 µm	Bocas

Cuando el relleno de las perforaciones es insuficiente o se ha realizado una excesiva remoción de material, el capacho deberá ser sometido nuevamente a los procesos de limpieza, precalentamiento y relleno con soldadura.

Se realizan ensayos no destructivos al finalizar el proceso esmerilado para averiguar la eventual presencia de defectos por poros, fisuras o grietas.

Puesto que el rodete es un elemento rotatorio se debe encontrar en perfecto balance. Ya que la cantidad de material en cada capacho ha cambiado, se debe realizar un balanceo estático por gravedad en donde se elimina el exceso de masa de cada capacho esmerilando la superficie exterior de estos, hasta alcanzar el equilibrio. No se acepta la adición de ningún tipo de peso compensador en el rodete.

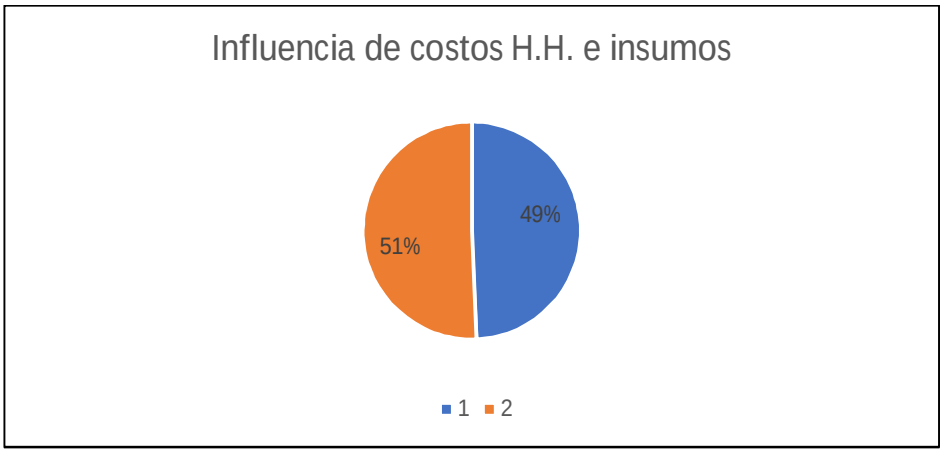
Se realiza tratamiento térmico de todo el rodete para el alivio de tensiones. Este proceso está regido por pautas, de manera de mantener control de la temperatura del rodete mediante una curva de tratamiento térmico.

Para finalizar, se prepara la superficie mediante granallado para la aplicación de recubrimiento anti desgaste mediante método *HVOF*, este consiste en la proyección a alta velocidad de partículas de carburo duro sobre la superficie, generando en ella una capa resistente al desgaste. Este proceso no está regido por pauta, por lo que la forma como los parámetros de la operación de recubrimiento son responsabilidad del contratista. Se debe cumplir con un espesor promedio de recubrimiento. Si la capa de recubrimiento es excesiva, se la debe retirar completamente e iniciar el nuevamente el proceso de recubrimiento.

4.1. Análisis de costos asociado a la recuperación

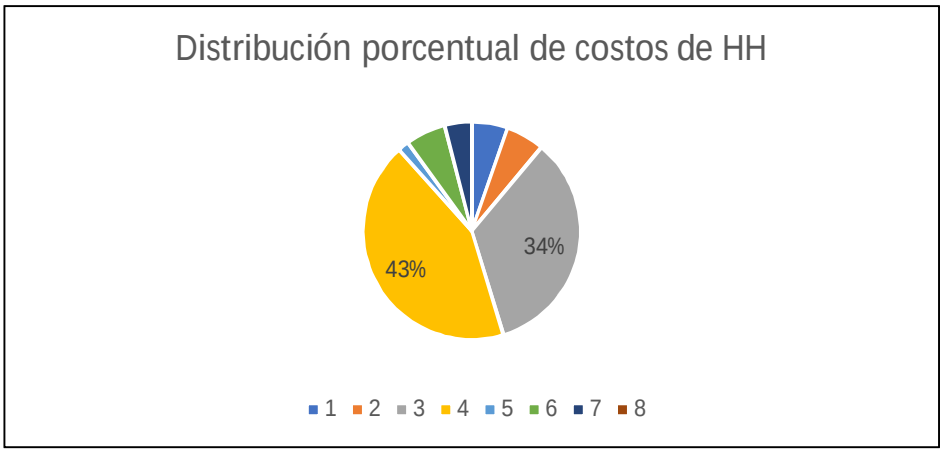
Analizar la influencia de cada una de las etapas del proceso en el costo total de la recuperación es útil para caracterizar el proceso y detectar etapas críticas. Puesto que la información oficial sobre el costo de la recuperación del rodete es de carácter confidencial, se realiza un análisis porcentual de influencia de cada etapa considerando costos de hora hombre e insumos involucrados.

Gráfico 5.2 muestra la influencia de los costos de HH marcado como (1) en azul y los costos de insumos marcados como (2) en color naranja.



Como primera conclusión del análisis se tiene que el costo de los insumos es similar al de las H.H., siendo estos un 51% y 49% del total respectivamente. Por lo que es posible disminuir los costos operacionales al disminuir el número de H.H involucradas.

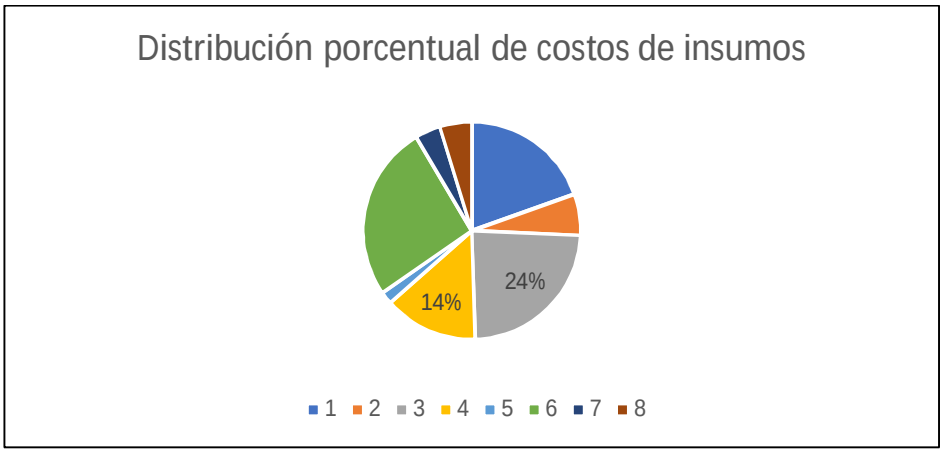
Gráfico 5.3 muestra la influencia de los costos de HH de cada tarea dentro del proceso de recuperación. Estas están representadas con (1) granallado inicial, (2) saneado, (3) soldadura, (4) esmerilado, (5) granalla final, (6) metalizado, (7) E.N.D y T.T. y (8) otros.



Al estudiar la ponderación de costo de cada operación sobre el total, se aprecia que la mayor parte de este es atribuible a la operación de esmerilado, el cual corresponde al 43%. El alto costo de esta operación se debe a la extensa labor que se realiza para recuperar la geometría. Como segunda operación de alto costo de H.H. se encuentra la soldadura, siendo un 34% de total. El valor de la H.H. en cada operación es similar, por lo que la diferencia se produce

debido al mayor requerimiento de tiempo de la operación de esmerilado, en la cual se llegan a acumular tiempos de HH cercanos a las 1200 horas.

Gráfico 5.4 muestra la influencia de los costos de insumos de cada tarea dentro del proceso de recuperación. Estas están representadas con (1) granallado inicial, (2) saneado, (3) soldadura, (4) esmerilado, (5) granalla final, (6) metalizado, (7) END y TT y (8) otros



Con respecto a los costos asociados a insumos, la mayor parte se concentra en el proceso de soldadura, siendo un 24% del total. Si se analiza la influencia del proceso de esmerilado en los costos de insumos, esta es baja, siendo solo el 14%.

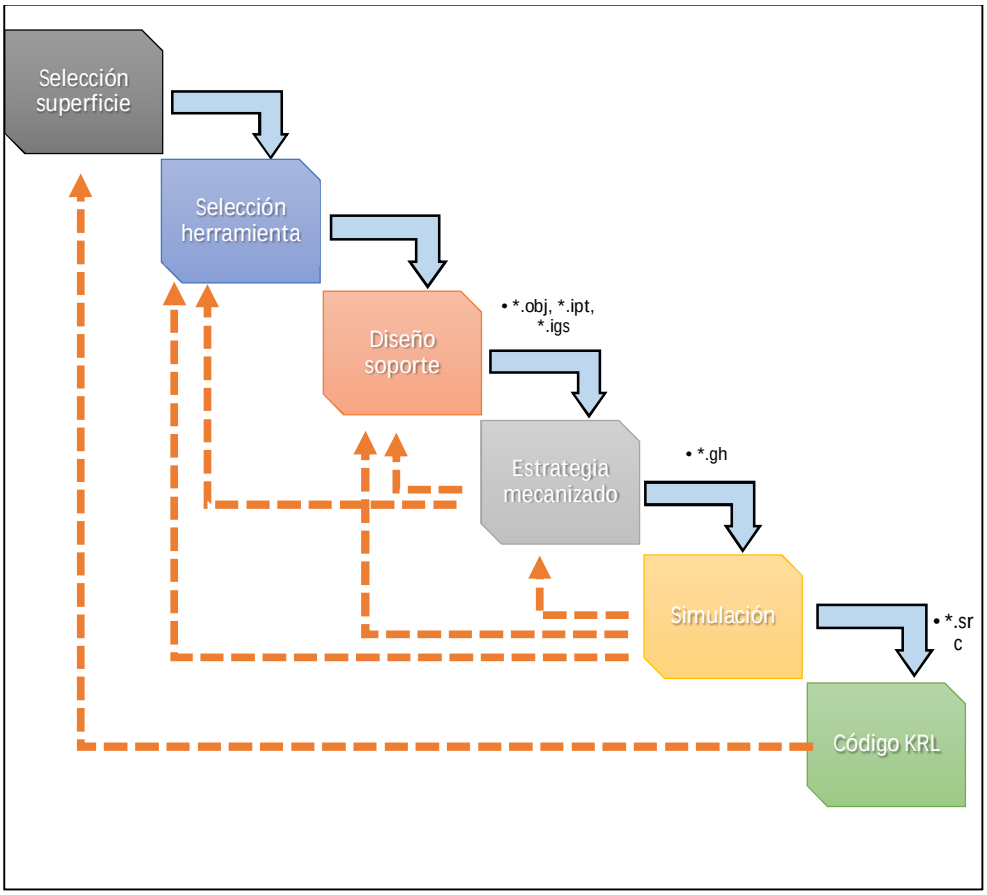
Las conclusiones anteriores plantean la necesidad de reducir el tiempo de HH durante el proceso de esmerilado para reducir los costos operacionales. Por otra parte, si se logra completar la recuperación del rodete en un menor periodo de tiempo, se mejora la competitividad de contratista, pues la extensión del tiempo de trabajo es factor discriminante en la adjudicación del contrato.

5. Desarrollo del programa de esmerilado usando KUKA prc

El modelo de programación *offline* está basado en el análisis de los movimientos del brazo robótico mediante su simulación en un entorno CAD.

Se plantea una estructura de trabajo iterativo para el desarrollo de la programación. Esta estructura permite modificar los parámetros fundamentales de la operación y analizar su efecto de manera inmediata mediante simulación.

Gráfico 6.1 El esquema muestra el modelo de trabajo iterativo y los parámetros de modificación. También se muestra el nombre de la extensión del archivo correspondiente a cada etapa

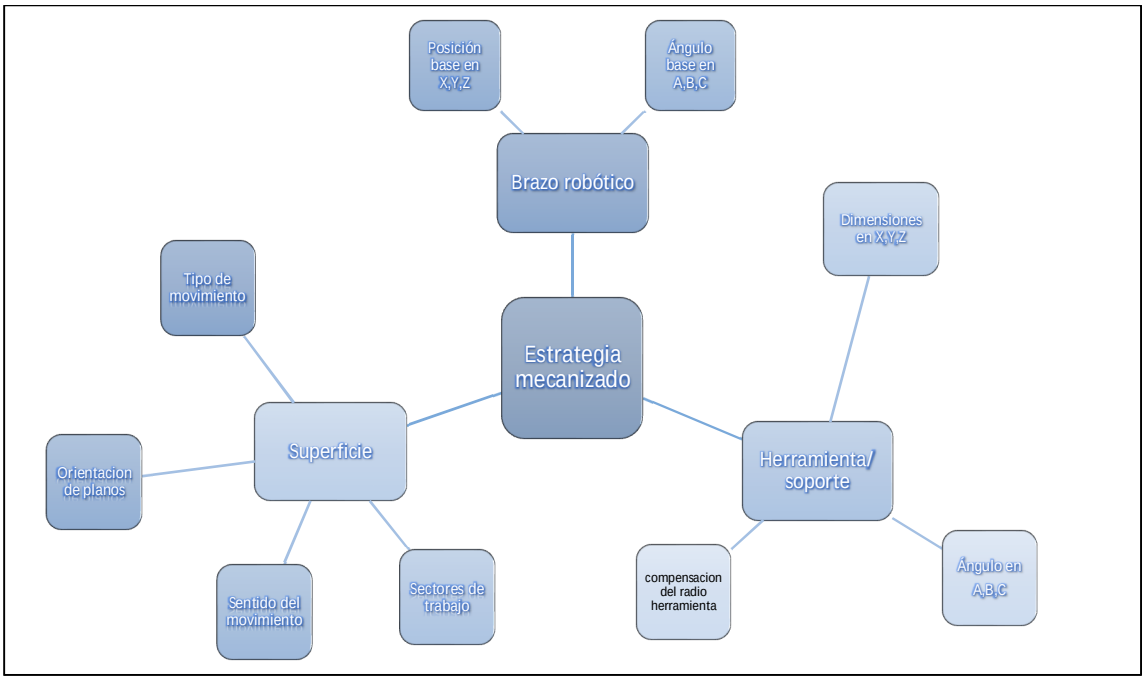


Se inicia el proceso con la selección de una superficie de trabajo, esta debe cumplir con la condición de ser una superficie única o *single surface*. Posterior a esto se realiza la eleccion de la herramienta mas idonea a la aplicación. Esta decisión está basada en el cumplimiento de requerimientos mecánicos de la operación y se deben considerar factores tal como es el

tipo de material de trabajo y su afinidad con la herramienta de corte, parámetros de mecanizado, geometria tanto de la herramienta como del consumible, disponibilidad en el mercado y su aptitud para el uso.

Mediante software CAD se modela el soporte de la herramienta. Se debe tener en consideración la restricción de espacio disponible para el movimiento de la herramienta en el área de trabajo.

Gráfico 6.2 esquematiza la estrategia de mecanizado planteada, los tres grandes grupos de interés son el brazo robótico, la superficie y el conjunto herramienta/ soporta



5.1. La estrategia de mecanizado

Se da paso a la estrategia de mecanizado. Tal como se muestra en el diagrama se modifican parámetros asociados a los tres componentes principales de la operación: el brazo robótico, la superficie, y el conjunto herramienta/soporte.

5.1.1. El brazo robótico:

La posición relativa entre la superficie de trabajo y el brazo robótico está determinada por la distancia en coordenadas (X, Y, Z) entre el sistema de referencia global y el sistema base del brazo robótico como también por la rotación en los ángulos (A, B, C) respectivos a cada eje.

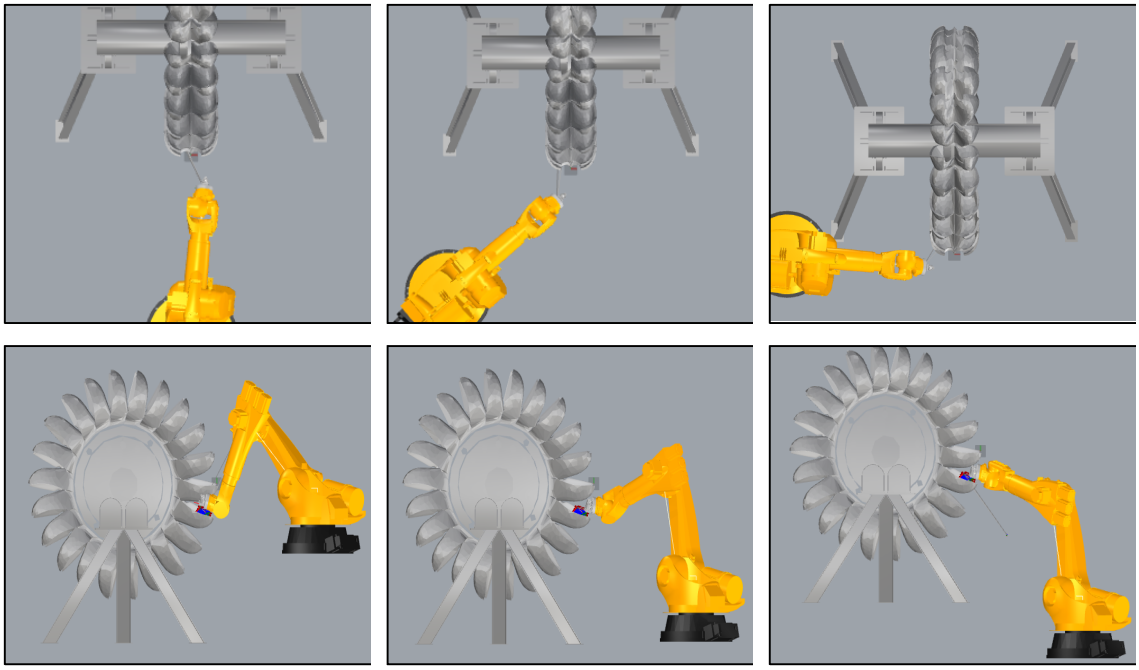


Imagen 6.1 El brazo robótico podrá disponerse en diferentes posiciones con respecto a la superficie de trabajo, un correcto posicionamiento es fundamental para lograr todos los movimientos requeridos y hacer cobertura total del área de trabajo.

5.1.2. La herramienta:

No es ideal realizar modificaciones sobre la herramienta, por lo que se debe diseñar un soporte para ella que mejore su uso en el área de trabajo.

La geometría del soporte debe mejorar la accesibilidad de la herramienta en el área de trabajo, de manera que no sea necesario el uso de herramientas adicionales para completar el mecanizado. La mejor forma para el soporte de herramienta será obtenida a partir de la iteración de modelos puestos a prueba en la simulación.

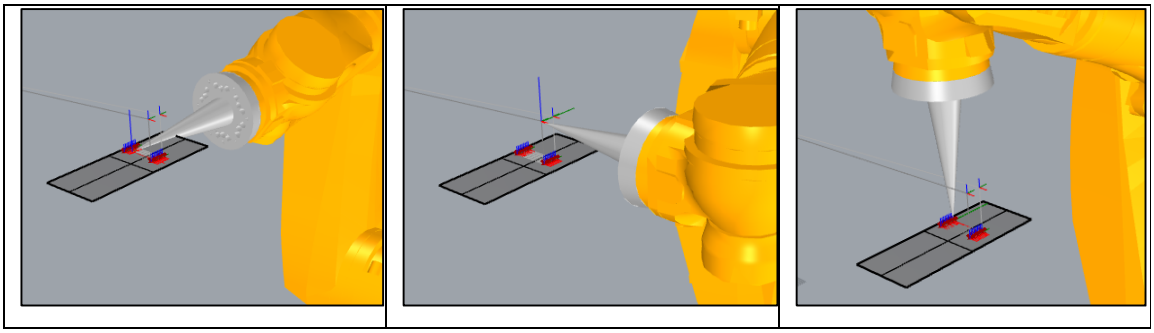


Imagen 6.2 la punta de la herramienta podrá aproximarse a un punto de distintas formas al modificar las coordenadas e inclinación del TCP

Ya que la operación de mecanizado será en pequeños subsectores de trabajo. Se debe considerar que estos subsectores tienen diferente curvatura y por lo tanto será necesario modificar la posición de la herramienta con respecto de cada superficie. Esta posición responde a la necesidad de accesibilidad al área de trabajo, como también por la conveniencia de ángulo de ataque.

La elección de la herramienta montada depende de la complejidad de la superficie a mecanizar. Una geometría esférica cuenta con un radio que describe la superficie de la punta, facilitando la compensación del radio de esta.

Es conveniente considerar como *TCP* al punto de origen del radio de la punta de herramienta, de esta manera se facilita el ajuste de compensación para la trayectoria como también el ajuste del desgaste de la herramienta. Ambos inconvenientes pueden ser solucionados al realizar un *offset* de la trayectoria programada. Este *offset* debe tener la misma magnitud que el radio de la punta de la herramienta, así se traza una trayectoria compensada que permite a la herramienta seguir la superficie y no ser afectada por su posición relativa a esta. Además, si se considera un desgaste homogéneo de la herramienta y se mantiene control de este, será posible compensar la reducción del radio de la herramienta mediante la disminución de la magnitud del *offset*.

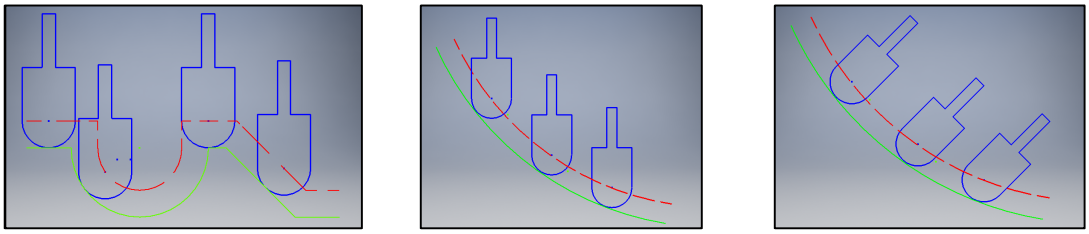


Imagen 6.3

5.1.3. La superficie

Para facilitar el proceso de trazado de la trayectoria sobre la superficie es se realiza una subdivisión de esta en subsectores más pequeños con un menor grado de variación de curvatura. El número y ubicación de las subdivisiones dependerá del resultado de la simulación, el cual puede revelar la necesidad de generación de nuevas subdivisiones para lograr abarcar toda la superficie.

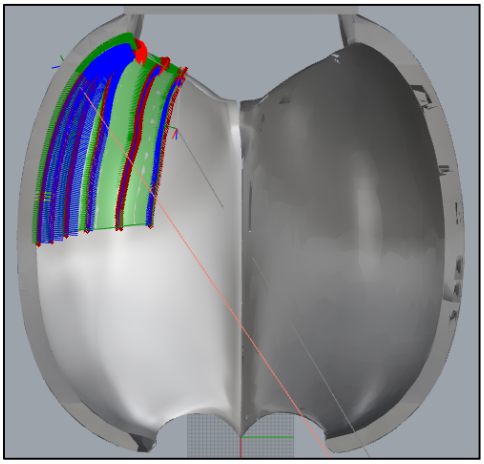


Imagen 6.4 representación de subdivisiones de la superficie del capacho. Estas son generadas a partir de una reparametrización de la superficie.

En conjunto a la creación de las subdivisiones de superficie se debe considerar el ángulo de incidencia de la herramienta sobre estas. Este parámetro debe ser ajustado en cada una de las subdivisiones.

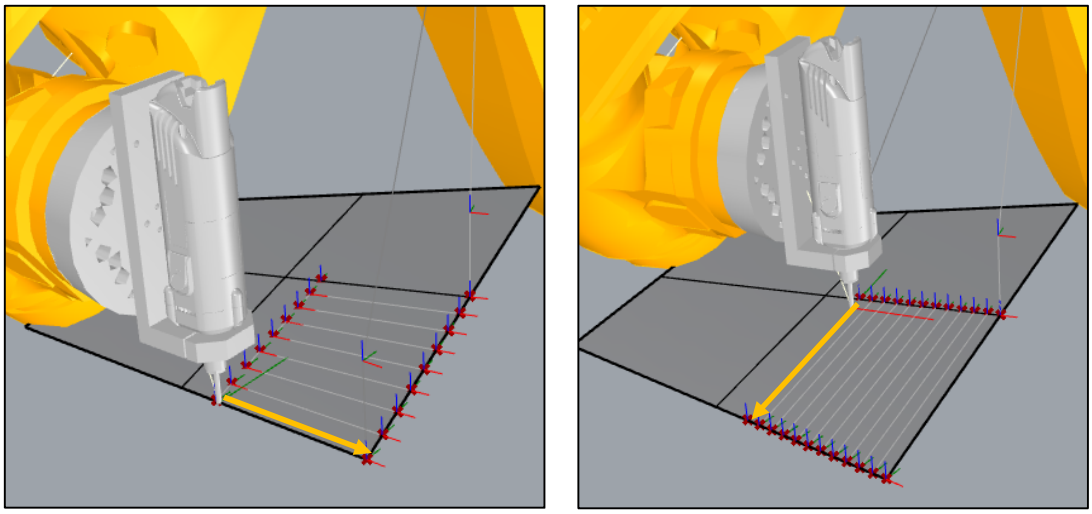


Imagen 6.5 14Tanto la forma de la trayectoria como el sentido del movimiento podrán ser ajustados según los objetivos de la operación.

El medio de control de este modelo de trabajo iterativo es el análisis mediante simulación de los movimientos frente a un modelo CAD de la superficie, por lo que los parámetros anteriormente presentados deben ser modificados hasta lograr una correcta simulación.

La detección de movimientos indeseados tales como singularidades y colisiones, se hace mediante análisis de la simulación de KUKA|prc. Esta herramienta presenta la informacion

en dos modalidades. La primera es mediante el entorno de visualizacion de *Rhinoceros* en donde se marca de color rojo al eslabon del brazo que este involucrado. La segunda es el *Simulation axis Graph* ubicado en la pestaña *Analysis* de KUKA|prc *Setting*. Este es un gráfico temporal del angulo desarrollado en cada eje, a medida que la simulacion avanza el grafico muestra de manera inmediata la informacion acerca de los ejes. Se utiliza un código de colores para marcar con una franja los segmentos de tiempo en donde ocurre una situacion fuera de lo esperado para alguno de los ejes.

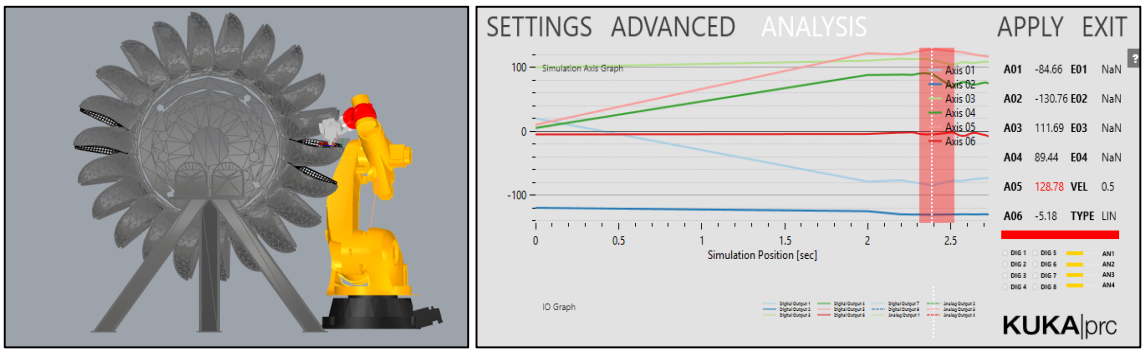


Imagen 6.615 muestra ambos modos de control de movimientos. A la izquierda en el entorno de Rhinoceros y a la derecha en el Simulation Axis Graph. Ambos modos pueden ser usados de manera simultánea.

5.2. Trazado de la trayectoria

La trayectoria es trazada usando *Grasshopper* mediante la manipulación de información acerca de la superficie de trabajo, para luego definir el tipo de movimiento a realizar y alimentar al ***Core*** de KUKA|prc para finalmente obtener un código KRL.

Se debe importar en *Rhinoceros* el archivo CAD que contiene el modelo 3D del entorno de trabajo. Luego la superficie de trabajo debe ser seleccionada y referenciada en *Grasshopper* mediante el comando ***Srf***. La superficie debe cumplir la condición de ser una superficie *NURBS o Single surface*.

Mediante el comando "***SubSrf***" se generan las subdivisiones de la superficie de trabajo mediante la definición de un dominio bidimensional. Es necesaria la reparametrización de la superficie de entrada. De modo que las coordenadas de los puntos que la componen ahora estén expresadas como función de los parámetros (u, v), por lo tanto, la superficie tiene su propio sistema de referencia local. El dominio de los parámetros (u, v) va de 0 a 1

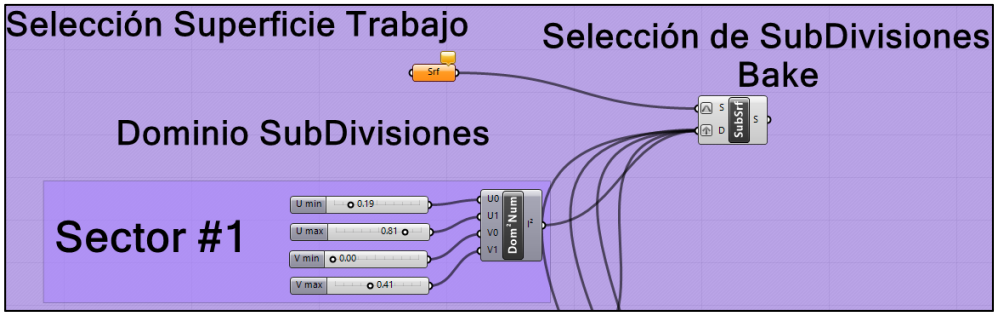


Imagen 6.7 mediante la definición de un dominio bidimensionales en u y v se delimitan las subdivisiones de la superficie. Se debe considerar que por ser esta una operación de mecanizado, los límites de las subáreas de trabajo deben quedar de manera traslapada, para así eliminar las rebabas generadas en el mecanizado

De modo de poder materializar estas nuevas superficies se realiza un ***Bake*** de la salida **S** del componente "***SubSrf***" dando paso a la creación de una nueva superficie en el entorno de *Rhinoceros*.

El trazado de la trayectoria sobre cada subdivisión generada inicia nuevamente con la selección y reparametrización de la superficie. Se considera en su dominio a la totalidad de la superficie.

Ya que la rutina de trabajo considera realizar un mecanizado desde capas externas hacia el interior, será necesario obtener proyecciones de la superficie de trabajo. Esto se realiza mediante el comando "***Offset***" las veces que sea necesario, este comando tiene como entrada **D** la magnitud de la distancia a desplazar. Así se obtiene una lista de superficies iguales y distanciadas según la distancia deseada. Es importante mantener un valor pequeño para el *offset*, de manera de no provocar distorsiones geométricas en la proyección de la superficie.

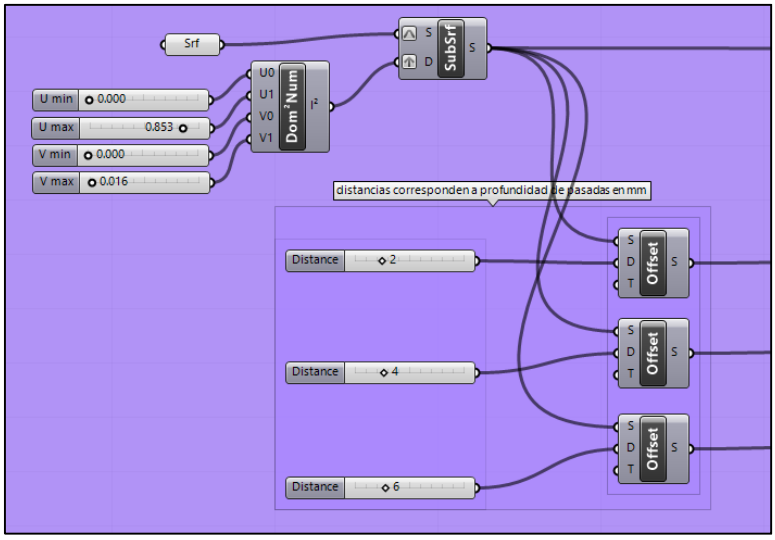


Imagen 6.8 muestra la generación de tres offset de la superficie. Las superficies obtenidas como resultado del offset deben ser seleccionadas según su orden en la secuencia de trabajo, en este caso será desde el exterior al interior.

Se generan curvas iso-paramétricas o isocurvas sobre la superficie. Estas están constituidas por puntos que mantienen constante uno de sus parámetros. De un punto P(u1, v1) podrán ser extraídas dos isocurvas de la forma C(u1, v) o C(u, v1). Como resultado del trazado de isocurvas en *u* y *v* se genera una grilla rectangular sobre la superficie.

A la salida del comando "**Iso**" se tiene al conjunto de isocurvas generadas para las direcciones *u* y *v*, se debe seleccionar la salida según conveniencia en el mecanizado.

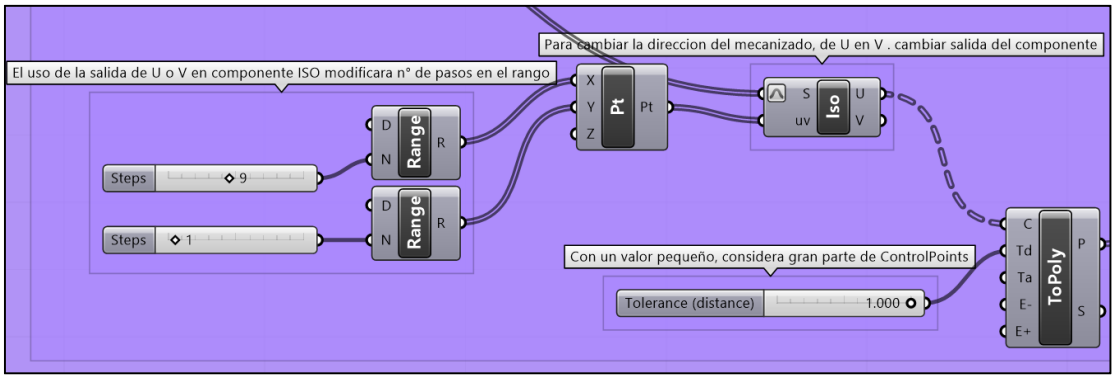


*Imagen 6.9 generación de curvas iso paramétricas mediante el comando **Iso.** Se tiene como entrada del comando a la superficie y al conjunto de puntos en donde se extraerán las curvas. El número isocurvas generadas está directamente relacionado con el paso del mecanizado o avance por pasada.*

Las isocurvas generadas son transformadas a *Polylineas* usando el comando ***"ToPoly"*** este tiene como entrada **C** a la curva y **Td** a la magnitud de tolerancia de distancia, al utilizar un valor pequeño de tolerancia se considera que la polylinea creada está definida por un mayor

número de puntos. Por lo que ahora se tiene un conjunto de Polylineas paralelas sobre la superficie.

Se desea trazar una trayectoria en forma de zigzag, por lo que es necesario alternar la dirección de las Polylineas. El comando "***Dispatch***" tiene como entrada la lista de *Polylineas* y la separa en dos listas A y B según un patrón booleano establecido en la entrada **P**. Las curvas de la salida **A** son invertidas usando el comando "***Flip***" y luego agrupadas con las curvas de la salida **B** mediante el comando ***"Weave"***. Este entrama una única lista que contiene a todas las Polylineas.

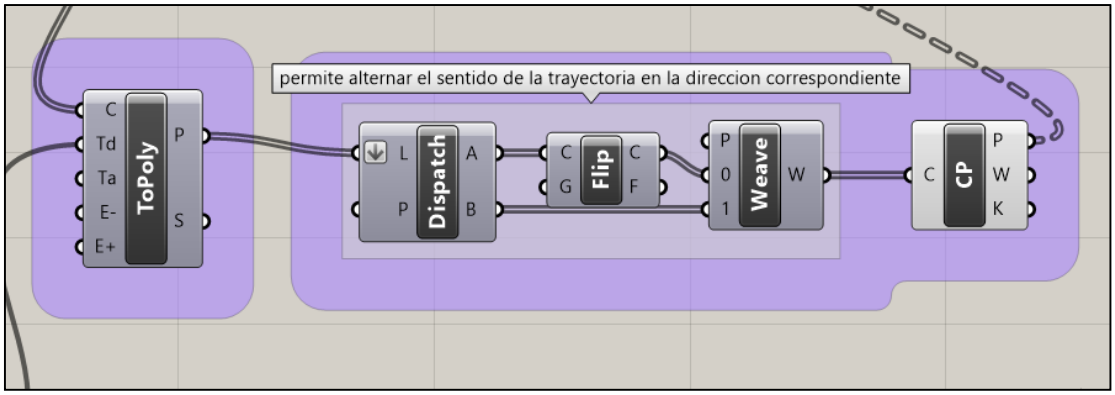


Imagen 6.10 generación de movimiento alternante mediante la separación de lista principal. Mediante comando "Flip" se invierte sentido de sub-lista A.

Se realiza la extracción de puntos de control de las Polylineas mediante el comando "***CP"***, los que serán usados como entrada del comando ***"Srf CP"*** para encontrar los puntos de la superficie que son más cercanos a los puntos de control de las Polylineas.

Los puntos determinados anteriormente son usados como entrada del comando ***"EvalSrf"*** para obtener información de la superficie en un punto de coordenadas locales. Se tiene interés en la salida ***F***, pues esta contiene información sobre los planos de cada coordenada **uvP** ingresada.

Ya se tiene una caracterización de la superficie en base a la extracción de isocurvas sobre ella. Los planos obtenidos como salida del comando ***"EvalSrf"*** servirán como referencia para el trazado de movimientos. Se debe ajustar la orientación del vector normal de cada plano para conseguir el ángulo de incidencia adecuado para la herramienta.

Para definir el movimiento del *TCP* entre planos de la superficie se utiliza el comando ***LIN MOVE***. Este comando pertenece al conjunto de funciones de KUKA|prc y tiene como entrada **PLN** la lista de planos referenciales sobre la superficie, y como salida tiene una lista de movimientos lineales que conforman la trayectoria.

En el caso de tener más de una superficie de trabajo, estas son trabajadas en forma paralela usando el mismo algoritmo planteado anteriormente y antes de ser introducidas en el ***Core*** son unidas en una lista única mediante el componente ***"CMD WEAVE"***.

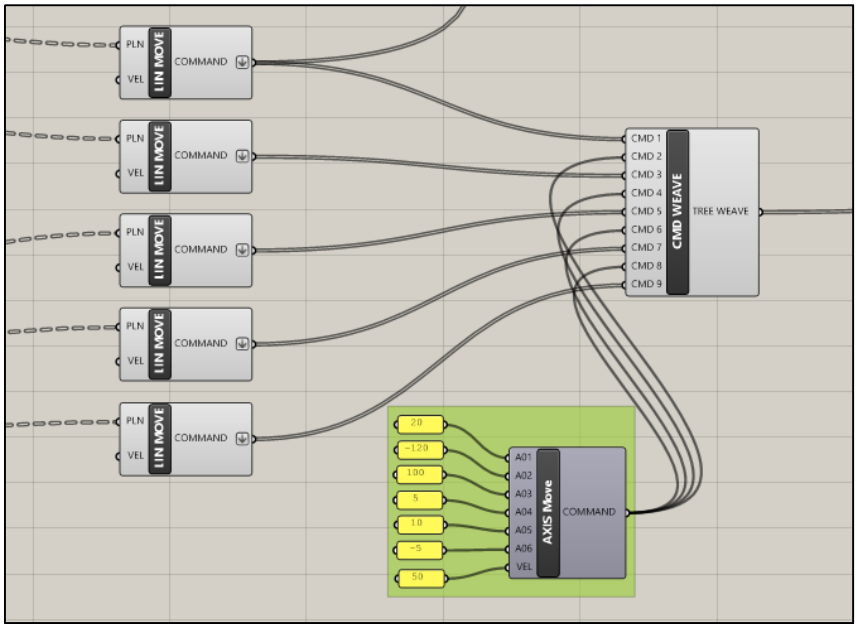


*Imagen 6.11 el componente Weave permite manipular el orden de trabajo de las superficies ingresadas, como también de integrar movimientos secundarios intermedios. Un movimiento secundario de conveniencia es la rotación de los ejes del robot a cierto valor de ángulo o **Axis Move**, este sirve para facilitar el desarrollo de los movimientos del robot en la siguiente superficie*

5.3. Obtención del código KRL

Este método propone recorrer la superficie mediante una trayectoria conformada por pequeños segmentos de líneas rectas los cuales son recorridos mediante movimientos lineales.

La lista de comandos a la salida del componente ***LIN MOVE*** debe ser introducida al ***"CORE"***. Este permite realizar el análisis de los movimientos y detectar irregularidades mediante sus herramientas de simulación y análisis gráfico de cada eje.

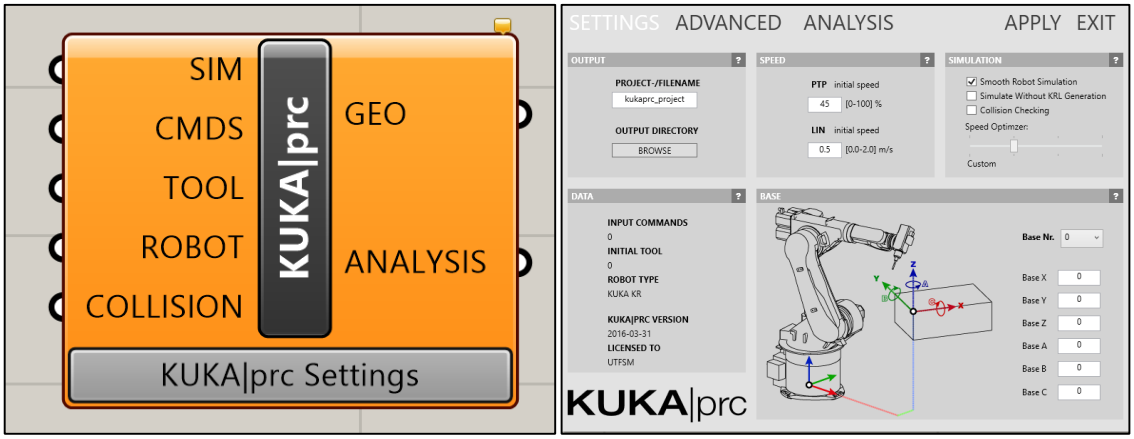


Imagen 6.12 a la izquierda comando CORE, en este se puede controlar la simulación mediante la entrada SIM. A la izquierda se muestra pestaña Settings, en ella se define información sobre la ubicación del brazo robótico.

El comando *"CORE"* requiere del ingreso de la lista de comandos de movimientos como también de toda la información acerca del entorno de trabajo del brazo robótico, tal como son las propiedades y geometría de la herramienta en TOOL, modelo del brazo robótico a usar en ROBOT, geometría 3D del entorno de trabajo en COLLISION. Es en este comando donde se deben ingresar las coordenadas de la base del robot, posiciones axiales de inicio y fin, y límites de velocidad para los movimientos LIN y PTP.

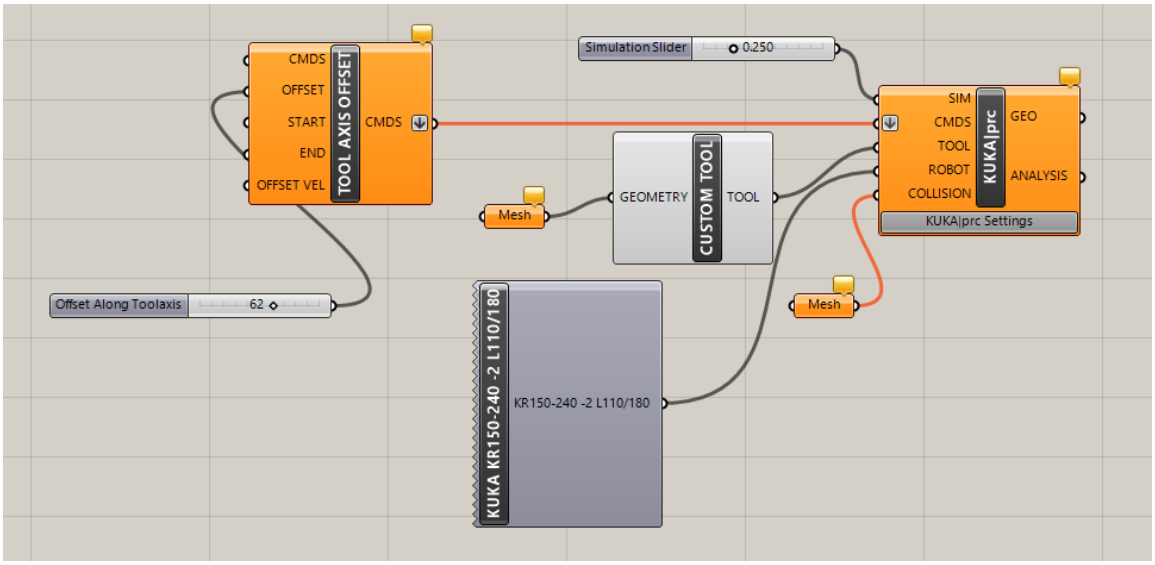


Imagen 6.13 se muestran los requerimientos de información para alimentar al componente CORE. Previo al ingreso de la lista de comandos al CORE, se utiliza el componente TOOL AXIS OFFSET, el cual agrega una serie de movimientos que permiten mejorar la llegada y salida de la herramienta durante el corte. Una vez que se ha ingresado toda la información requerida por el CORE se procede a realizar la simulación

El proceso de generación de la trayectoria y código KRL será controlado mediante la simulación en KUKA|prc, por lo que se podrá realizar una evaluación inmediata sobre el desempeño de la operación e introducir cambios al modificar parámetros tales como: la posición del brazo robótico frente al rodete, geometría y ángulo de incidencia de la herramienta, geometría del soporte de la herramienta, inclinación de los planos característicos de la superficie.

6. Evaluación de alternativas bajo análisis de decisiones

La propuesta de mejoras tecnológicas al proceso está basada en los antecedentes recopilados de la operación. Para evitar subjetividades la toma de decisiones sobre las alternativas tecnológicas a usar será basada en el análisis de decisiones. Este es un método de evaluación y puntuación de alternativas frente a diversos factores. Se deben considerar dos grupos de factores llamados objetivos obligatorios y objetivos deseados.

Los objetivos obligatorios son las condiciones de carácter necesario para la operación, por lo que cada alternativa planteada debe ser evaluada bajo estos objetivos. Solo serán tomadas en cuenta aquellas alternativas que cumplan con todos los objetivos obligatorios.

Los objetivos deseados ayudan a comparar el desempeño y características adicionales de las diferentes alternativas que ya cumplen con los objetivos obligatorios. Estos objetivos son listados y a cada uno se le asigna un peso o valor de 0 a 3. Las alternativas deben ser valoradas frente a cada objetivo deseado, en donde se las puntuará con nota de 0 a 3. Para finalizar se obtiene el producto entre los pesos y valuaciones de cada alternativa para obtener sus respectivas ponderaciones. Así, la alternativa que obtenga la suma total más alta será la que responde de mejor manera a los requerimientos planteados.

Luego de realizar el análisis basado en los objetivos obligatorios y deseados, se debe realizar un análisis de condiciones adversas, en donde se exponen características adicionales que podrían afectar negativamente a la solución.

6.1. Elección de la herramienta

A continuación, se presentan diversas opciones de herramientas que permiten realizar la tarea de esmerilado, las principales diferencias entre ellas recaen en el tipo de accionamiento.

6.1.1. Herramientas eléctricas convencionales

Equipos de fácil uso, portables y con amplio rango de potencias. Estos son conectados a red monofásica. El rango de velocidad de giro en vacío va desde 1.500 hasta 30.000 [r.p.m]. La desventaja del uso de este tipo de herramientas es tu tamaño, por lo que se tiene una mala relación potencia/volumen.

6.1.2. Herramientas eléctricas de alta frecuencia

Equipos de fácil uso y portables, con amplio rango de potencias. Su principal característica es el uso alta frecuencia en la corriente de alimentación, lo que permite alcanzar una alta potencia sin necesidad de aumentar su tamaño ni su peso. Para su funcionamiento se requiere de un convertidor de alta frecuencia, el cual eleva el valor 50 [Hz] a 300 [Hz]. Estos equipos trabajan en régimen de giro en vacío desde 5.000 [r.p.m] hasta 18.000 [r.p.m]. Utilizan motores de inducción libres de escobilla, por lo que tienen una mayor vida útil al no estar estos elementos en constante roce. El motor se encuentra encapsulado y protegido contra el polvo.

La desventaja de estas herramientas es su tamaño, por lo que se tiene una medianamente buena relación potencia/volumen.



Imagen 7.116 esmeriladora recta manual de alta frecuencia marca Fein. Estas herramientas son muy similares a las herramientas eléctricas convencionales, pero al trabajar con alta frecuencia logran el desarrollo de mayor potencia.

6.1.3. Herramientas neumáticas

Funcionan con motores neumáticos, por lo que requieren de la producción, acondicionamiento y distribución del aire comprimido.

Son resistentes al bloqueo por sobrecarga, por lo que se pueden desarrollar un alto par en comparación a las herramientas eléctricas. Estos equipos trabajan en régimen de giro en vacío desde 4.500 [r.p.m.] hasta 80.000 [r.p.m.].

Las herramientas neumáticas son compactos y ligeras, por lo que se consigue una buena relación potencia/volumen. Como desventaja se tiene la disminución de la potencia en el equipo a medida que sus componentes se desgastan y provocan fugas de aire.



Imagen 7.217 equipo neumático utilizado en el esmerilado de sobre monta de cordones de soldadura. Estos equipos funcionan con un motor neumático accionado por aire presurizado.

6.1.4. Herramientas de eje flexible

En estos equipos el motor se encuentra alejado de la herramienta. La transmisión de potencia entre motor y herramienta es mediante un eje flexible. Las herramientas son compactas y se tiene una buena relación potencia/volumen.

La ventaja del uso de este equipo es la flexibilidad que permite en el trabajo en comparación a herramientas eléctricas convencionales. Estos equipos trabajan en régimen de giro desde 850 [r.p.m.] hasta 16.200 [r.p.m.].

Las desventajas de su uso están relacionadas al cuidado del eje flexible, pues su longitud es limitada y siempre se debe cuidar no exceder el radio y ni el torque crítico de este.



Imagen 7.3 herramienta de eje flexible marca Suhner modelo Rotar 4.2. El motor se encuentra alejado de la punta de herramienta, por lo que se tiene una buena relación potencia/volumen.

Tabla 7.1 cuadro resumen de alternativas de herramienta

Alternativas	
A	Herramienta eléctrica convencional
B	Herramienta eléctrica alta frecuencia
C	Herramienta neumática
D	Herramienta de eje flexible

Como objetivos deseados se tienen:

- Un bajo costo: la herramienta es solo uno de los componentes de la celda de mecanizado, por lo que su costo no debe influir de manera excesiva.
- Trabajar con un mecanismo sencillo: Un menor número de piezas y un funcionamiento simple reducen probabilidad fallas.
- Posibilidad de uso de otra herramienta: la herramienta permite el montaje de piedras o muelas abrasivas de diferentes formas
- Fácil instalación: Instalación de dispositivo no debe interferir mayormente en la operación.
- Cumple con requerimientos de régimen de giro y potencia: la herramienta es apta para la operación de mecanizado, cumple con la potencia necesaria.
- Buena relación potencia/volumen: la herramienta tiene alta potencia en comparación a su volumen.

Tabla 7.2 resumen de los objetivos obligatorios y deseados. Se muestra peso o valor de objetivos deseados.

Objetivos		**Peso o Valor [0,1,2,3]**
Obligatorios	Es portátil	N.A
	Herramienta indicada para operación esmerilado	N.A
	Disponible en mercado	N.A
Deseados	Bajo costo	2
	Mecanismo sencillo	1

	Posibilidad de uso de otras herramientas en su punta	2
	Fácil instalación	1
	Cumple con requerimientos de régimen de giro y potencia.	3
	Buena relación potencia/volumen	3

Tabla 7.3 evaluación de las alternativas frente a los objetivos obligatorios Todas las alternativas cumplen con la totalidad de los objetivos obligatorios, por lo que todas serán analizadas bajo los objetivos deseados

Objetivos		**A**	**B**	**C**	**D**
Obligatorios	Es portátil	OK	OK	OK	OK
	Herramienta indicada para operación esmerilado	OK	OK	OK	OK
	Disponible en mercado	OK	OK	OK	OK

Tabla 7.4 muestra valoración para cada alternativa bajo los diferentes objetivos deseados. Se muestra en la última fila el puntaje obtenido para cada alternativa. Este puntaje se calcula como la suma total del producto de las notas y las valoraciones.

Objetivos		**Alternativas**			
		A	B	D	E
Deseados	Bajo costo (2)	2	1	2	2
	Mecanismo sencillo (1)	1	2	3	1
	Posibilidad de uso de otras herramientas en la punta (2)	3	3	2	3
	Fácil instalación (1)	3	2	2	2
	Cumple con requerimientos de régimen de giro y potencia. (3)	3	3	3	3
	Buena relación potencia/volumen (3)	1	2	3	3
Total		26	27	31	31

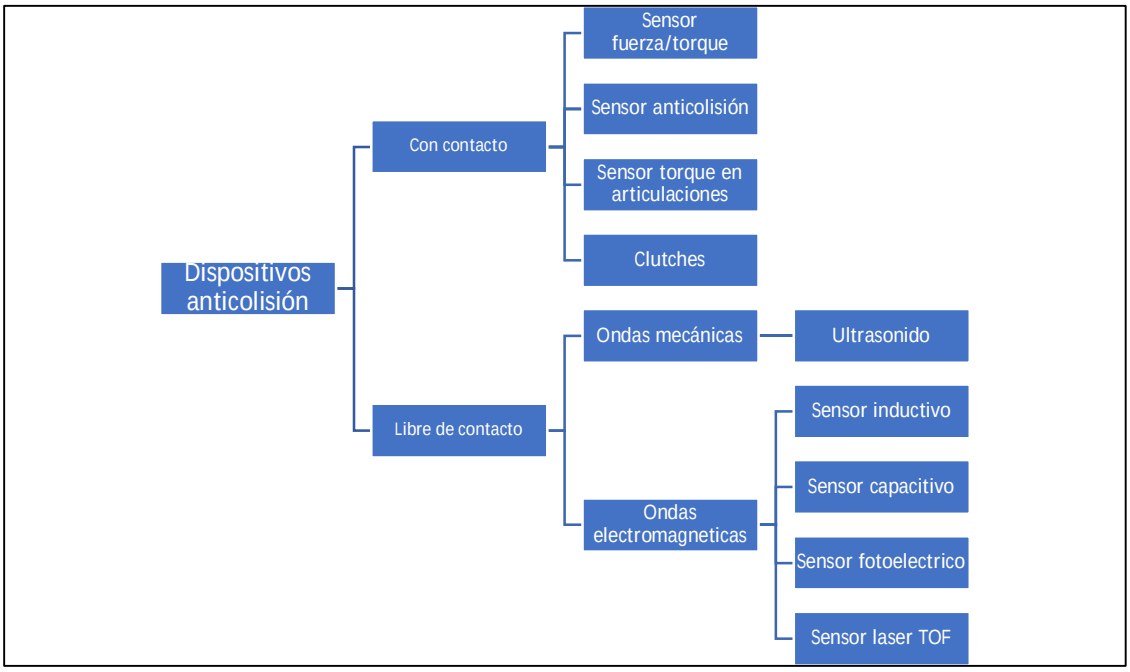
Del análisis anterior se concluye que las mejores alternativas son las herramientas de eje flexible y las herramientas de accionamiento neumático. Si bien ambas alternativas

obtuvieron la misma ponderación de puntaje, se prefiere el uso de herramientas de accionamiento neumático por su simplicidad. Si se deseara usar la herramienta de eje flexible se agregan numerosas restricciones a la operación relacionadas con el cuidado del eje flexible.

6.2. Elección del dispositivo de seguridad anticolisión

Este es el conjunto de dispositivos que ayudan a detectar posibles colisiones entre el brazo robótico y el entorno de trabajo. Estos se encuentran separados en dos grandes grupos, los dispositivos de contacto y dispositivos libres de contacto. La gran diferencia entre ellos es que los dispositivos libres de contacto actúan como sistema de detección por proximidad y realizan la detección a distancia, mientras que en los de contacto la detección ocurre cuando ya existe contacto con el obstáculo. A continuación, se hace revisión de las tecnologías de detección de colisiones.

Gráfico 7.1 se esquematizan los grupos de dispositivos anticolisiones, estos se encuentran separados en dos grandes grupos: dispositivos de contacto y libres de contacto.



6.2.1. Sensor anticolisión regulable mediante sistema neumático

Dispositivo montado en la muñeca del brazo robótico, este tiene como función la detección de colisión y absorber la energía del impacto entre la herramienta y el obstáculo y evitar daños en el brazo robótico, la herramienta y la superficie de trabajo.

Cuando se supera el esfuerzo límite preestablecido se produce el movimiento del vástago, activando interruptor de envío de señal de detención de emergencia.

El mecanismo interno del sensor ayuda en primera instancia a absorber la energía del impacto para luego usarla en la reincorporación del *TCP* a su última posición previa a la colisión.

La desventaja del uso de este tipo de sensor es que se pierde la posibilidad de detectar colisiones que ocurran con otros miembros del brazo robótico, pues solo se cuenta con información sobre el estado de esfuerzo de la muñeca del brazo. Por otra parte, al ser un equipo de contacto, la detención del brazo robótico se realiza solo cuando la colisión ya ha ocurrido.

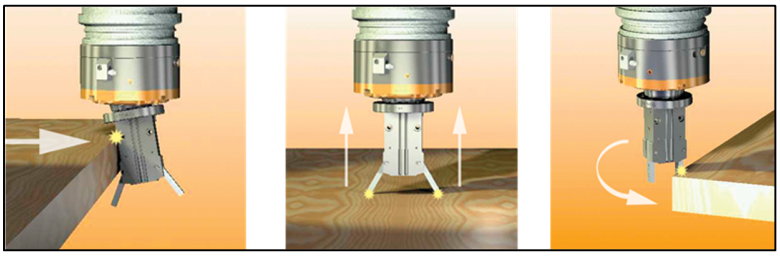
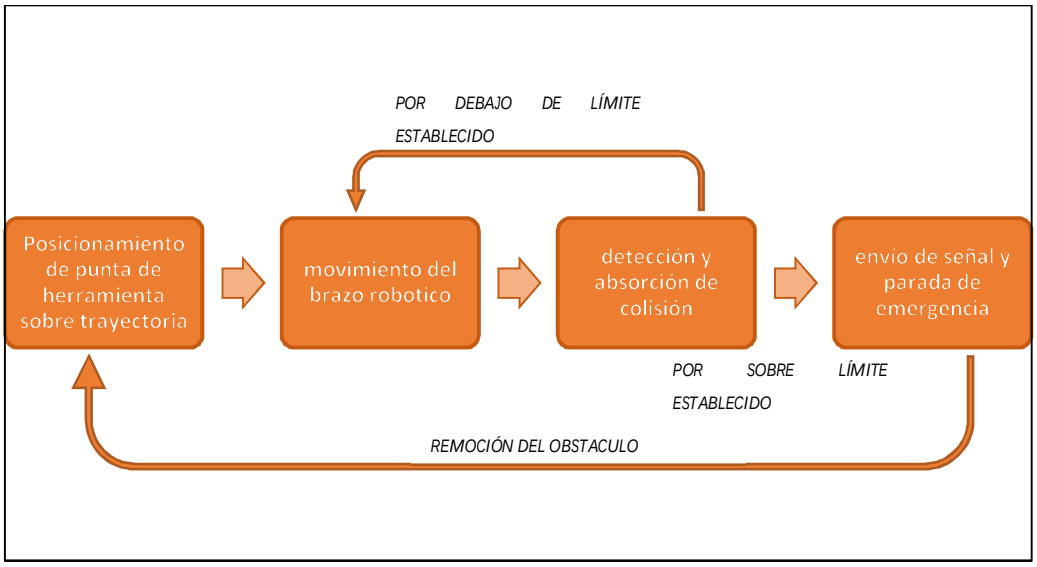


Imagen 7.4 Este tipo de sensor trabaja con seis grados de libertad, permitiendo movimientos axiales en X, Y, Z junto a sus correspondientes ángulos, es decir es capaz de sentir fuerzas axiales compresivas, momento flector y torsión. Además, tiene la posibilidad de ajustar dinámicamente su sensibilidad mediante la variación de la presión de alimentación. (ref 11)

Gráfico 7.2 se esquematiza el funcionamiento del sensor anticolisión regulable neumáticamente. en el momento de la colisión se podrán seguir dos caminos dependiendo de la magnitud del esfuerzo generado por la colisión. Si el valor no supera al máximo establecido entonces se sigue con el movimiento, pero si el valor supera al máximo se activa el mecanismo interno, despresurizando la cámara y deteniendo el brazo robótico hasta la remoción del obstáculo. Este dispositivo tiene la ventaja de auto retornar a su última posición previa a la colisión.



6.2.2. Sensor fuerza torque multi eje

Dispositivo montado en la muñeca del brazo robótico, tiene como principal función medir continuamente estado de fuerza y torque resultante para los ejes X Y Z.

Este está constituido por un arreglo de *strain gauges*, mediante los cuales se convierten cargas mecánicas en señales eléctricas, las que sirven para cuantificar el estado de fuerza y torque.

La ventaja del uso de este dispositivo es que permite realizar tareas en donde se requiere que la fuerza aplicada sea constante. Se puede considerar que al incorporar este dispositivo en el brazo robótico se lo está dotando con el sentido del tacto, ampliando la versatilidad de las aplicaciones de estos.

La desventaja de su uso es que solo se cuenta con información sobre la muñeca del brazo, sin posibilidad de detección de colisiones de otros miembros. Por otra parte, este tipo de dispositivo es sensible a la sobrecarga, al dañarse los strain gauges se afecta la precisión y repetibilidad de lectura del equipo de manera permanente. Por último, estos tienen un alto costo debido a la complejidad electrónica su construcción.

6.2.3. Sensor de torque en ejes

Este dispositivo de detección de colisión se encuentra instalado en los ejes del brazo robótico y permite mediante un arreglo de *strain gauge* medir el esfuerzo torsional instantáneo para cada eje, el valor es comparado con el máximo permitido y de ser este superado se envía señal de detención de emergencia.

El sensor es capaz de determinar solo el estado de torsión de un eje, por lo que tiene una construcción más simple. Al usar un conjunto de sensores en los ejes se logra abarcar la detección de colisiones de todos los miembros del brazo robótico.

La desventaja de este tipo de sensor es que este solo detecta la colisión luego de ya ocurrida. Además, este tipo de dispositivo no otorga la posibilidad de absorber la energía de la colisión.

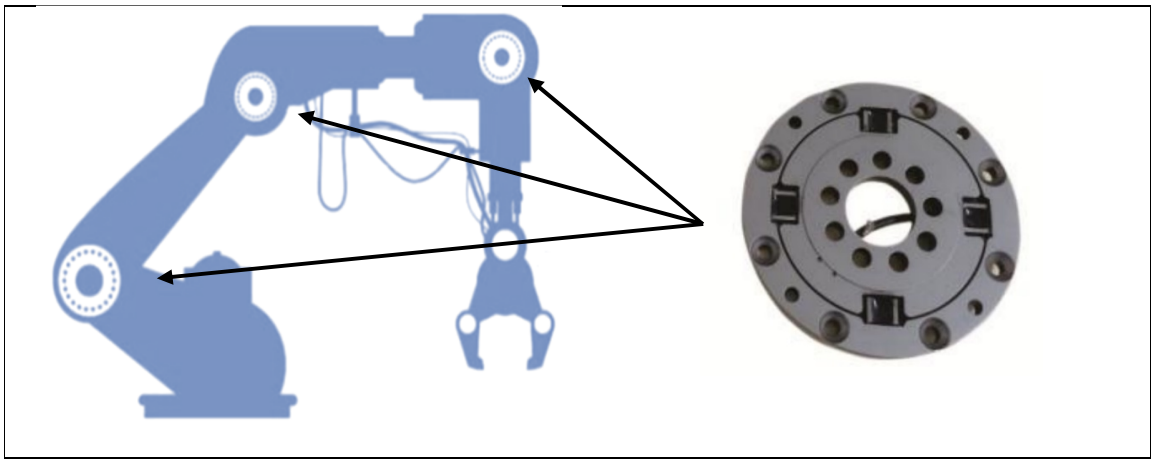


Imagen 7.5 18 se muestra disposición de los sensores de torque en los ejes del brazo robótico. Si se instala un conjunto de ellos es posible realizar la detección de colisiones en todo el brazo robótico.

6.2.4. Sensores fotoeléctricos:

Están constituidos por un emisor y un receptor, los que podrían estar ubicados juntos en una misma carcaza como en el caso de los sensores fotoeléctricos difusos.

El emisor envía un haz de luz (pulsos infrarrojos, laser o luz visible roja) el cual se propaga en todas direcciones dentro del área de visión. Cuando la luz se encuentra con algún objeto, se refleja parte de esta en su superficie y retorna al receptor. Si la intensidad de la luz que incide en el receptor es suficiente, se envía señal de salida. Este tipo de sensor es dependiente de las características reflectivas de la superficie, siendo inútil para superficies transparentes.

6.2.5. Sensor laser TOF

Este dispositivo trabaja iluminando el ambiente con una fuente modulada de luz y luego observar el retorno de la luz reflejada. Puesto que la velocidad de la luz es conocida, mediante la medición del desface entre el pulso enviado y el reflejado, es posible determinar la distancia de cada uno de los puntos que se encuentren dentro del rango de visión, generando un mapa de profundidad para cada píxel dentro del rango de visión.

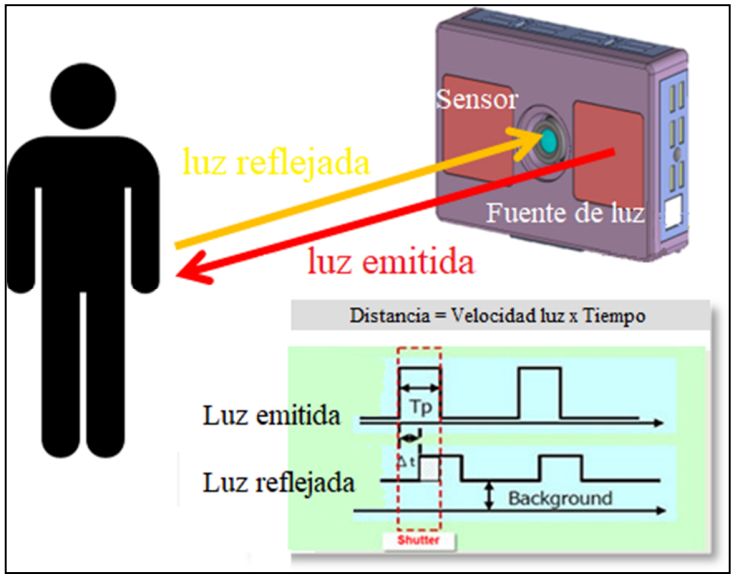


Imagen 7.619 En este tipo de sensor se cuantifica el tiempo que toma un pulso laser emitido en chocar en contra de un objeto y volver. Luego el tiempo medido es transformado en distancia. Generalmente la fuente de iluminación es láser o led trabajando en el rango cercano al infrarrojo.

6.2.6. Sensores ultrasónicos

Este sensor libre de contacto emplea ondas de sonido para la detección de objetos. Al usar ondas mecánicas se podrán detectar objetos de diferentes formas, superficies, colores y transparencia.

Dentro de esta categoría se encuentran los sensores reflectivos de tipo difuso, el cual funciona enviando pulsos ultrasónicos desde un emisor y se esperando su retorno a un receptor, los cuales se encuentran ubicados uno junto al otro. Estos sensores son capaces de detectar la presencia de objetos dentro de su rango de funcionamiento, también variantes que entregan el valor de la distancia al objeto próximo.

6.2.7. *Sensores inductivos*

Este sensor libre de contacto puede detectar materiales ferrosos. Está constituido por cuatro grandes partes: núcleo de ferrita con espiras, oscilador, gatillo Schmitt y un amplificador de salida.

El oscilador crea un campo magnético oscilante simétrico el cual es irradiado desde el núcleo de ferrita. Para cuando un cuerpo ferroso entra en el campo magnético, pequeñas e independientes corrientes, llamadas corrientes de Eddy, son inducidas en la superficie del metal. Esto produce un cambio en la frecuencia natural del circuito magnético reduciendo la amplitud de oscilación. El gatillo Schmitt responde al cambio en la amplitud y envía la señal. Debido a las limitaciones del campo magnético, este tipo de sensores tiene un estrecho rango de sensibilidad, desde fracción de milímetros hasta los 60 [mm] en promedio.

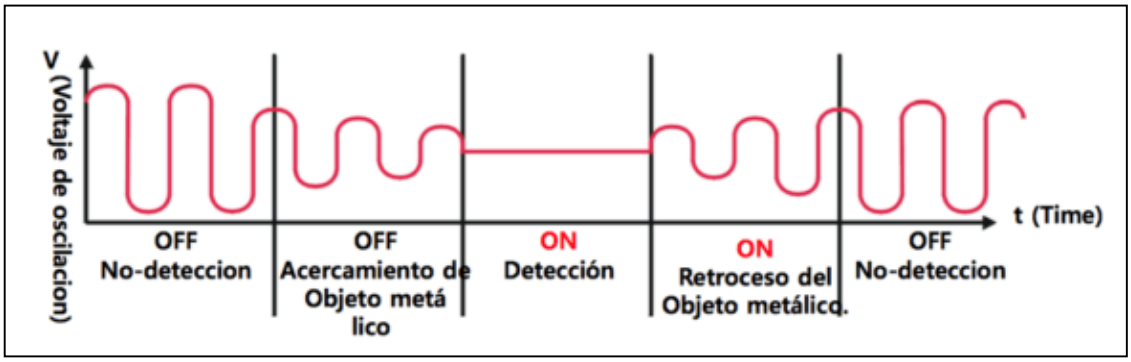


Imagen 7.720 cuando un objeto ferroso entra del área sensible produce un cambio en la reluctancia del circuito magnético, decae la amplitud y se realiza su detección.

6.2.8. *Sensores capacitivos*

Este tipo de sensores puede detectar materiales tanto ferrosos como no mediante la lectura de la alteración de la amplitud oscilación del circuito. Está constituido por dos placas conductoras que se encuentran a diferentes potenciales y aisladas entre ellas, del mismo modo que en un condensador de placas paralelas que genera un campo eléctrico. Cuando un objeto entra en la zona sensible, se genera un cambio en la capacitancia del circuito oscilador, aumentando la amplitud de oscilación y cambiando el estado del gatillo Schmitt para dar señal de detección. Si el cuerpo se aleja de la zona sensible, la amplitud de oscilación decrece y la señal de salida cambia.

Debido a la capacidad de detección de múltiples objetos, se debe mantener fuera del rango de los sensores a cuerpos que no se desean detectar para así evitar falsas señales.

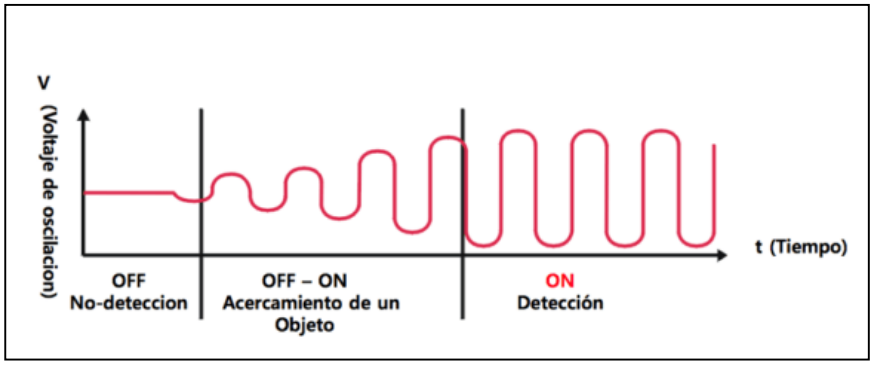


Imagen 7.821 cuando un objeto entra en la zona sensible provoca un cambio en la capacitancia del circuito oscilador, aumentando la amplitud y cambiando el estado del gatillo Schmitt.

6.2.9. Clutches

La función de este dispositivo es detectar el impacto de la herramienta contra la superficie de trabajo o algún otro objeto, comparar la fuerza de impacto con un valor preestablecido y si este es superado se envía una señal eléctrica para producir la parada de emergencia, el dispositivo también tiene la función de absorber la energía del impacto. La sensibilidad de este equipo puede ser modificada para acomodarse a la aplicación.

Tabla 7.5 resumen de alternativas de dispositivos anticolisión.

	Alternativas
A	Sensor fuerza/torque
B	Sensor anticolisión de activación neumática
C	Sensor torque en articulaciones
D	Clutches
E	Ultrasonido
F	Sensor inductivo
G	Sensor capacitivo
H	Sensor fotoeléctrico
I	Sensor laser TOF

Tabla 4

Como objetivos deseados se tienen:

- Bajo costo: Dispositivo de detección de colisión es solo un dispositivo de apoyo, su costo no debe influir de manera excesiva.
- Mecanismo sencillo: Un menor número de piezas y un funcionamiento simple reducen probabilidad detección erróneas y fallas.
- Posibilidad de uso de otra herramienta: Dispositivo permite el acoplamiento de variedad de herramientas.
- Fácil instalación: Instalación de dispositivo no debe interferir mayormente en la operación.
- Sensibilidad ajustable: Nivel de esfuerzo admisible en la detección de colisión ajustable para uso en diversas operaciones.
- Detección en muñeca del robot: Detección de colisión del *TCP* o de herramienta contra superficie de trabajo, o elementos de la celda.
- Detección en cuerpo del robot: Detección de colisión de los miembros del brazo robótico contra superficie de trabajo o elementos de la celda.
- Detección en múltiples direcciones: dispositivo con posibilidad de detección en más de una dirección.
- Absorción de energía de impacto: la absorción de la energía del impacto reducirá daño sobre superficie de trabajo, herramienta y brazo robótico.
- Auto recuperación de posición posterior a colisión: el dispositivo es capaz de recuperar de manera autónoma su última posición previa a la detección de colisión.

Tabla 7.6 resumen de objetivos obligatorios y deseados para las alternativas de dispositivo anticolisión. Se muestra el peso o valor de cada uno de los objetivos deseados

Objetivos		**Peso o Valor [0,1,2,3]**
Obligatorios	Detección oportuna de colisión	N.A
	Envió de señal de detención	N.A
	Disponible en mercado	N.A
Deseados	Bajo costo	2
	Mecanismo sencillo	1
	Posibilidad de uso de otras herramientas	2

	Fácil instalación	2
	Sensibilidad ajustable	3
	Detección en muñeca de robot	3
	Detección en cuerpo del robot	1
	Detección en múltiples direcciones	2
	Absorción de energía de impacto	3
	Auto Recuperación de posición posterior a colisión	2

Tabla 7.7 resumen de evaluación bajo objetivos obligatorios. Solo aprueban las alternativas: A, B, D, E, H, I. El resto de las alternativas es descartado por no cumplir el criterio de encontrarse disponibles en el mercado.

Objetivos		**Alternativas**								
		A	B	C	D	E	F	G	H	I
Obligatorios	Detección oportuna de colisión	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
	Envió de señal de detención	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
	Disponible en mercado	OK	OK	NO	OK	OK	NO	NO	OK	OK

Tabla 7.8 muestra valoración para cada alternativa bajo los diferentes objetivos deseados. Se muestra en la última fila el puntaje obtenido para cada alternativa. Este puntaje se calcula como la suma total del producto de las notas y las valoraciones.

Objetivos		**Alternativas**					
		A	B	D	E	H	I
Deseados	Bajo costo (2)	1	1	1	2	2	1
	Mecanismo sencillo (1)	1	2	2	1	1	1
	Posibilidad de uso de otras herramientas (2)	3	3	2	3	3	3
	Fácil instalación (2)	2	2	2	1	1	1
	Sensibilidad ajustable (3)	1	3	2	1	1	2

	Detección en muñeca de robot (3)	3	3	3	1	1	2
	Detección en cuerpo del robot (1)	0	0	0	2	2	2
	Detección en múltiples direcciones (2)	3	3	3	1	1	1
	Absorción de energía de impacto (3)	0	3	3	0	0	0
	Auto Recuperación de posición posterior a colisión (2)	0	3	0	0	0	0
Total		31	53	42	23	23	25

Del análisis de alternativas de dispositivo anticolisión, la opción que obtiene el mejor puntaje es el sensor anticolisión de activación neumática, por lo tanto, se define como la mejor alternativa de solución a los requerimientos del problema.

Como punto negativo de este dispositivo es su alto costo, el cual es cercano a los 3,000 USD, adicional a esta situación se tiene que los fabricantes no cuentan con representación en el territorio nacional, por lo que la adquisición de este debe ser vía importación directa y no se cuenta con asistencia técnica próxima.

7. Propuesta de mejora tecnológica y costo asociados

Una vez comprobada la factibilidad del mecanizado de los capachos por medio de un manipulador robótico industrial mediante simulación, es posible realizar una propuesta para la implementación del modelo en la realidad. Por lo que se deben considerar los accesorios que complementaran el trabajo del brazo robótico y los costos asociados.

Durante el desarrollo de la simulación del entorno de trabajo se diseñó el soporte para la herramienta abrasiva, este fue integrado como parámetro en la estrategia de trabajo, por lo fue modificado hasta conseguir la geometría que otorgue la mayor accesibilidad de la herramienta en el área de trabajo.

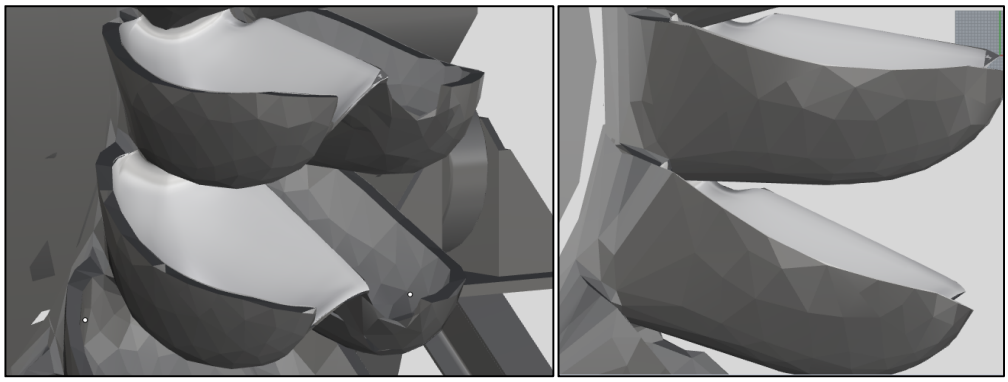
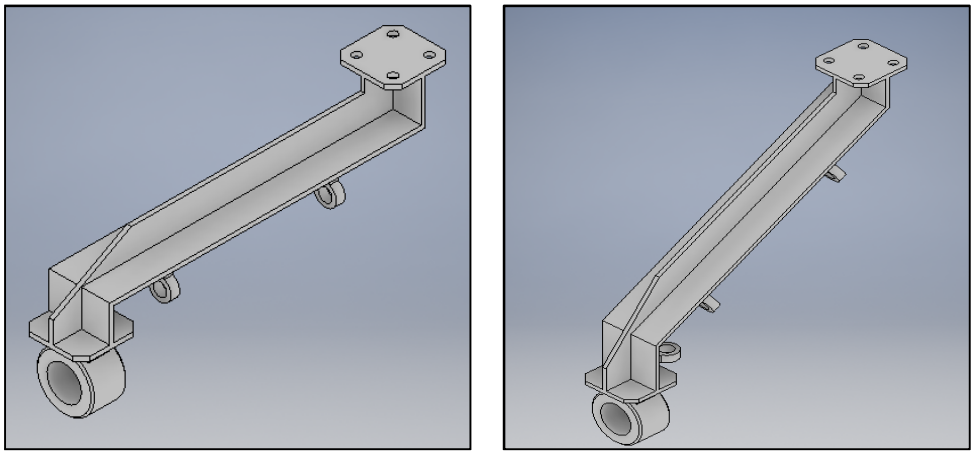


Imagen 8.122 vista del área de trabajo sobre la superficie del capacho. Son notables las restricciones de espacio para el movimiento de la herramienta debido a la cercanía entre capachos aledaños.

El soporte de herramienta comprende al brazo que sirve de extensión del flange de la muñeca, como al sistema de fijación de la herramienta.



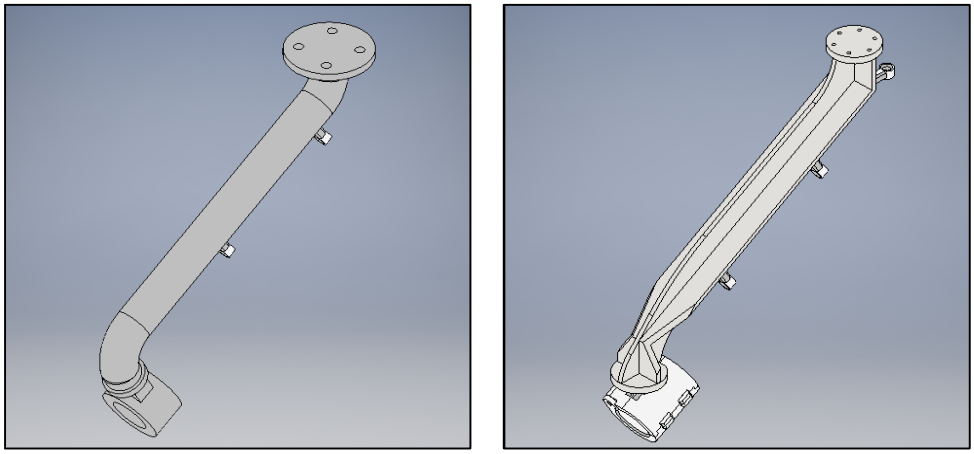


Imagen 8.2 diferentes modelos de portaherramientas fueron generados durante el desarrollo del trabajo hasta determinar la mejor geometría para este.

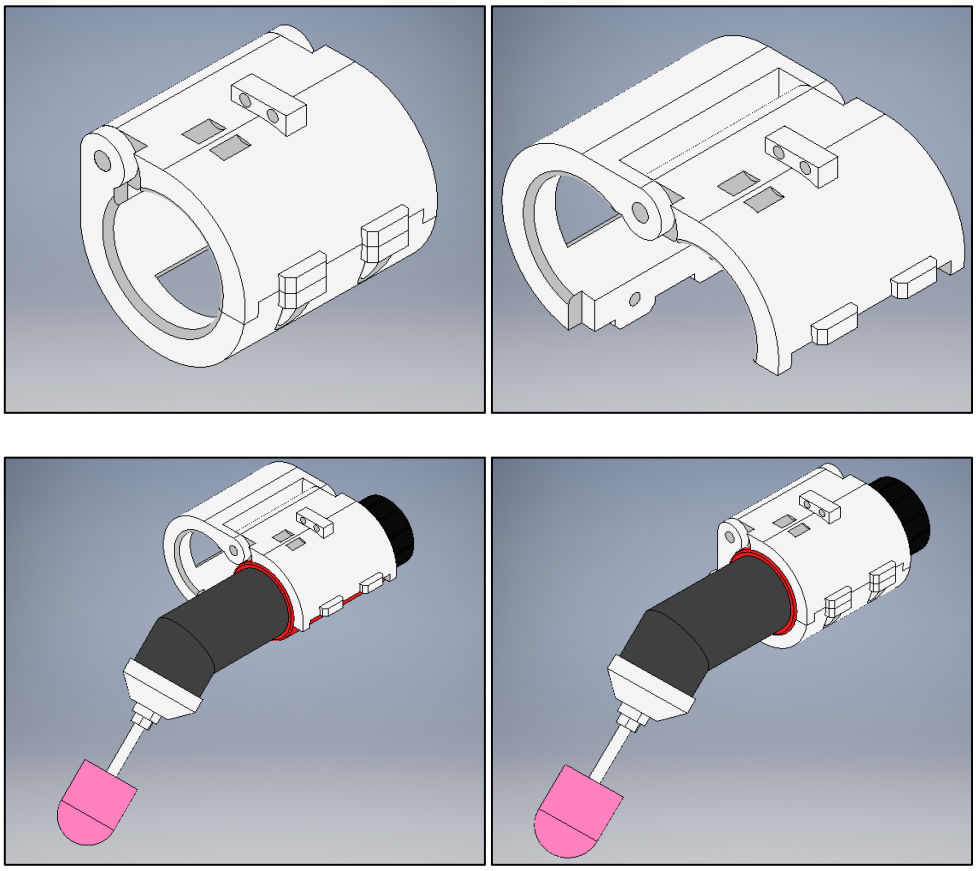


Imagen 8.323 modelo CAD de sistema fijación de herramienta. Compuesto de dos partes unidas por un eje. El funcionamiento es el de una mordaza, pues se permite sujetar la herramienta al ejercer presión sobre ella. El cierre de la mordaza es mediante uniones roscadas.

Finalmente, los componentes diseñados son reunidos en un ensamble junto a la herramienta y otros accesorios. El archivo debe ser exportado a *Rhinoceros*, en donde se realiza un

enmallado de la superficie. Puesto que para el manejo de grandes cantidades de información se requieren más recursos computacionales, por lo que el mallado de la superficie es grueso.

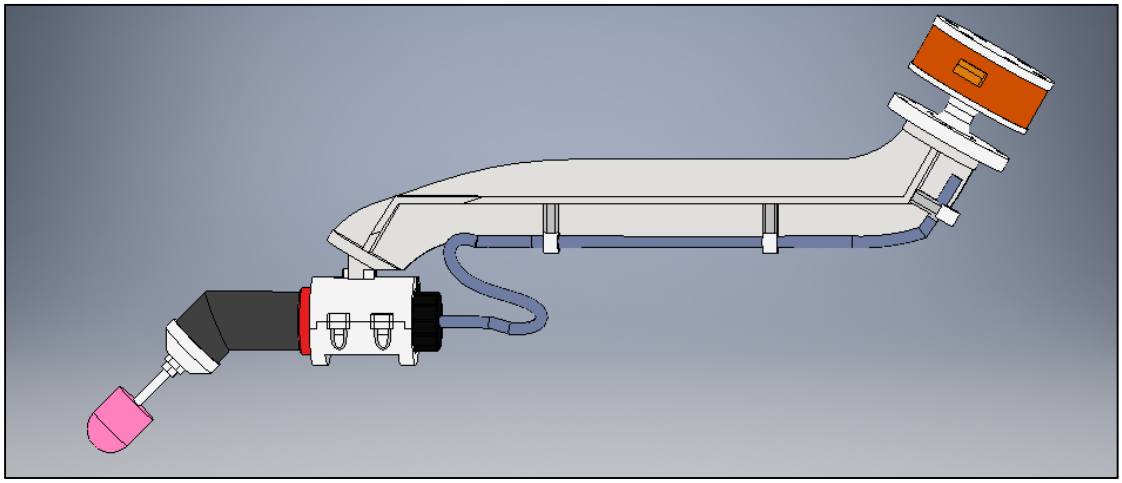


Imagen 8.4 vista lateral del diseño del conjunto de soporte final.

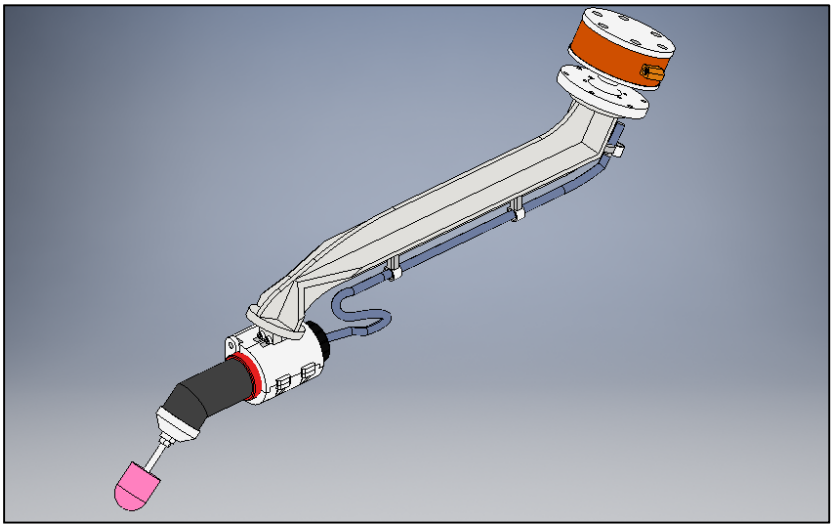


Imagen 8.524 vista isométrica del conjunto de soporte final.

A continuación, se muestra una lista de los componentes considerados en el modelo simulado computacionalmente:

Tabla 8.1 resumen de los componentes considerados en la simulación y su respectivo costo. si bien el costo unitario de la piedra abrasiva es muy bajo, el costo aumenta al considerar el número de piedras necesarias para la operación.

Tipo	**Marca, modelo**	**Precio estimado en USD**

Manipulador robótico industrial	Kuka, Kr150-2	20.000
Sensor anticolisión	ATI, SR-176 15 psi spring	3.000
Herramienta neumática	Suhner, LWC 17 45º top	1.200
Piedra abrasiva	Tyrolit, piedra montada 32x40x6x40	6

Los precios de los equipos son recogidos de catálogos de proveedores en el extranjero por lo que se debe considerar la importación de los componentes por no contar con representación de las marcas en el territorio nacional.

El costo del soporte de herramienta se debe determinar de manera diferente pues este es un componente construido a la medida, por lo tanto, se involucran costos de hora hombre, hora máquina, materiales y desarrollo del diseño.

Tabla 8.2 se presentan las estimaciones correspondientes de los costos asociados a la manufactura del soporte de herramienta.

Ítem	**Costo unitario**	**Cantidad h**	**Total**
Hora Hombre	10.000 CLP/h	5	50.000 CLP
Hora máquina	10.000 CLP/h	3	30.000 CLP
Materiales	1.500 CLP/Kg	5	7.500 CLP
Diseño	15.000 CLP/h	3	45.000 CLP
TOTAL			132.500 CLP

Luego se estima un costo total de 24.400 USD para la adquisición de los componentes del conjunto simulado en el entorno CAD, a este se debe agregar el costo del desarrollo de la programación del brazo robótico.

Si bien la programación *offline* tiene la ventaja de realizar el trazado de trayectorias de manera remota desde un ordenador, el alto tiempo empleado en el modelamiento del entorno de trabajo del robot es un factor negativo. Por lo que el costo de la programación de la trayectoria del brazo robótico depende de la complejidad del modelo a simular.

Conclusiones

En el presente trabajo se estableció una metodología para la generación de trayectorias de movimiento para un brazo robótico industrial mediante programación *offline* usando programación paramétrica. De esta forma es posible trazar de manera simple las trayectorias a seguir por el brazo robótico industrial. Otorgando flexibilidad en la aplicación de estos, pues es posible desarrollar tareas tales como mecanizado, soldadura y pintura.

Se analiza la influencia de la generación de hidroelectricidad en nuestro país y se estudia el fenómeno de desgaste de los componentes de las turbinas, haciendo énfasis en los rodetes tipo Pelton. Del análisis de la importancia de la hidroelectricidad, se proyecta que con el pasar del tiempo la demanda por reparación de los componentes ira en crecimiento.

Posteriormente se estudiar el caso específico de la recuperación de rodetes tipo Pelton en nuestro país. Por lo que se realiza un análisis del proceso actual de recuperación y se concluye que es posible obtener beneficios al realizar una mejora en la etapa de mecanizado de la superficie, pues en esta generan la gran parte de los costos operacionales debido al alto requerimiento de H.H., siendo este valor cercano a las 1500 horas, el que equivale a un 43% del costo total de H.H.

Del análisis del proceso se concluye que es factible la implementación de un sistema manipulador robótico industrial, pues condiciones tales como la ejecución de tareas repetitivas en un área de trabajo bien establecida ameritan la incorporación de un sistema automatizado. Para logro de este objetivo se requirió del desarrollo de un método de trabajo para el trazado de las trayectorias y control del brazo robótico.

Se plantea un modelo de trabajo iterativo para la generación de las trayectorias y correspondiente código KRL del brazo robótico. En cada iteración se introducen modificaciones en parámetros característicos de la operación y se analiza su efecto mediante simulación. Si el resultado de una iteración no cumple con los objetivos planteados, se inicia nuevamente el proceso de modificación de los parámetros considerando como información base el resultado de la iteración anterior.

La simulación del proceso en un entorno CAD para la programación *offline*, es una herramienta de gran ayuda, ya que permite visualizar de manera inmediata los efectos de los

cambios introducidos en los parámetros característicos de la operación. La herramienta de simulación también resulta muy útil para realizar un rediseño y optimización del layout de la celda de trabajo. Para lograr una correcta simulación del proceso se debe realizar el modelamiento 3D de la celda de trabajo, la herramienta, el soporte de esta y la superficie de trabajo.

El archivo KRL obtenido mediante la programación *offline* es igual al que podría obtenerse mediante programación convencional *online*, pero tiene la ventaja de que permite la incorporación de una gran cantidad de información al programa en un corto tiempo.

Se trazaron trayectorias para el mecanizado de la superficie del capacho mediante programación paramétrica al usar *Grasshopper* y KUKA|prc. El uso de estas herramientas de programación permite caracterizar la operación según parámetros de interés, los cuales son modificados progresivamente hasta cumplir el objetivo deseado.

Se sistematiza el proceso de generación de trayectorias sobre una superficie y se propone un modelo de trabajo iterativo para la obtención del archivo con los comandos del brazo robótico. En cada iteración se introducen modificaciones de los parámetros y se analiza su efecto mediante simulación en un entorno CAD. De no ser satisfactorio el resultado se lo utiliza como punto de partida para la siguiente iteración.

Se desarrollo el diseño de un soporte de herramienta que permite mejorar la accesibilidad en el área de trabajo. El diseño de este soporte se realizó utilizando el software CAD Inventor y se realización modificaciones graduales según los requerimientos. Para iniciar se plantea un modelo simple que sirve de extensión de la muñeca el cual es integrado al desarrollo de ensayos previos. Hasta este momento no se ha considerado el trabajo sobre la superficie del capacho, en su lugar se utiliza una superficie simple que sirve como base de aprendizaje en el trazado de las trayectorias. En esta etapa del trabajo se desarrolló la primera parte del algoritmo de trabajo de *Grasshopper*, el que consiste en el trazado de la trayectoria sobre la superficie mediante la reparametrización de esta y la extracción de isocurvas.

Es conveniente el trazado de una trayectoria en forma de zigzag, emulando el trabajo de una rectificadora sobre la superficie. Para conseguir esta trayectoria el TCP recorrerá isocurvas sobre la superficie, al completar un segmento se produce un traslado a la siguiente isocurvas

paralela y se retoma el movimiento, esta vez en sentido contrario. El paso del mecanizado está directamente relacionado con la distancia entre as isocurvas paralelas, por lo que este parámetro será ajustado según los requerimientos de la operación.

Mediante análisis de decisiones se concluye que la mejor alternativa de herramienta a usar en el mecanizado abrasivo de la superficie de los capachos es la de accionamiento neumático. Esta tiene múltiples ventajas tales como contar con una muy buena relación potencia/volumen, capacidad de auto refrigeración mediante el aire presurizado de uso, par torque ajustable, posibilidad de usar variedad de piedras abrasivas y ser resistentes al bloqueo del motor por sobrecarga. Utilizando este mismo método de toma de decisiones, se determina que la mejor alternativa entre los dispositivos de detección de colisiones es el sensor anti colisión activado neumáticamente. Sus principales ventajas son la capacidad de detección de esfuerzos compresivos axiales, momentos flectores y torque para el actuador final del brazo robótico, la sensibilidad es ajustable e incorpora un mecanismo interno que permite absorber energía del impacto para luego utilizarla en la reincorporación del TCP a su última posición previa a la colisión. Ambos componentes complementarios deben ser modelados para ser integrados a la metodología de trabajo.

Al trabajar con la superficie del capacho surgen múltiples restricciones de espacio para el movimiento de la herramienta, por lo que en esta etapa la geometría del soporte se vuelve más compleja. Ya que la herramienta que fue seleccionada para la aplicación pertenece a un catálogo comercial, no es conveniente realizar modificaciones en ella. Por lo que es necesario el planteo de un buen diseño del soporte para lograr la accesibilidad total de la herramienta en el área de trabajo.

Durante la realización del presente trabajo se presentaron obstáculos que frenaron el desarrollo por momentos, pero que fueron superados con éxito. Un gran desafío fue la obtención de la geometría de la superficie en forma de NURBS, pues solo se cuenta con un archivo CAD de la geometría del rodete representada como un conjunto de polígonos. Es necesario el trabajo con superficies tipo NURBS para poder realizar la reparametrización de estas, por lo que se agregó una etapa previa en el desarrollo del trabajo que constó de la reparación del mallado de la superficie, pues esta presentaba gran número de discontinuidades e irregularidades. Así posteriormente se proceder a la transformación de la

superficie conformada por polígonos a una superficie gobernada según un modelo matemático.

El trabajo sufrió cambios desde su primer planteamiento, pues inicialmente solo consideraba la generación de una solución en específico al caso del mecanizado abrasivo la superficie de los capachos, pero a medida que se logró un mayor dominio de las herramientas computacionales utilizadas para la programación, fue posible extrapolar esta solución a una secuencia de trabajo general, en donde el brazo robótico podrá recorrer diferentes superficies, cargar diversas herramientas y efectuar variadas tareas.

A partir del resultado positivo de la simulación se asegura la factibilidad de la automatización del proceso de esmerilado de rodetes tipo Pelton, pero para su implementación se deben guardar precauciones relacionadas a la validación del modelo simulado. Se deben determinar empíricamente los parámetros de mecanizado de la operación, tales como profundidad de corte, la velocidad de avance y la velocidad de corte de la herramienta. Se recomienda la incorporación de un sistema mediante un haz de luz láser. Este permite verificar el correcto posicionamiento de los componentes de la celda de forma que se replique lo planteado en la simulación.

El uso de la herramienta de control paramétrico de robots KUKA|prc dentro del entorno de programación de algoritmos *Grasshopper* representa una importante contribución a la programación *offline*, pues permite el desarrollo de nuevas aplicaciones de manera simple e intuitiva. La gran ventaja de la programación usando *Grasshopper* es que facilita la generación de algoritmos de procesamiento de información, pues no es necesario aprender un nuevo lenguaje de programación para poder realizarlo. Al ser este un software paramétrico, permite la edición y manipulación de gran cantidad de información en poco tiempo.

Los softwares que permiten la programación *offline* pueden ser encontrados en el mercado, pero requieren de una importante inversión. A pesar de ello, cada día se crean nuevos programas de libre acceso, por lo que no es difícil imaginar la creación de nuevos softwares que permitan mejorar el proceso de programación *offline*.

Algunos de los resultados esperados de la implementación de programación *offline*:

- La programación se realiza de manera remota, por lo que el programador no es expuesto a situaciones de riesgo.
- No es necesaria la detención del brazo robótico para su programación.
- Permite la optimización del layout de la celda de trabajo.
- Disminución de costos operacionales de programación.
- Reducción del tiempo de programación.
- Permite una fácil y rápida modificación de la secuencia de movimientos.

Algunos de los resultados esperados al implementar un brazo robótico industrial en el proceso de recuperación de los capachos son:

- Lograr la repetibilidad del proceso de esmerilado entre capachos.
- Reducción de costos operacionales al reducir el número de H.H involucrados en el proceso de mecanizado abrasivo.
- Disminuir el tiempo de permanencia del rodete en taller al lograr la recuperación del perfil en un menor tiempo.
- Optimización del proceso de esmerilado. Al estandarizar los procesos se logra controlar los costos y tiempos de forma efectiva.

Para finalizar, la proyección a futuro de este trabajo es lograr la optimización del algoritmo actual en cuanto a la obtención de información sobre la superficie. Es posible la implementación de un cabezal que incorpore elementos ópticos de medición, los cuales retroalimentan de información al sistema y permiten modificar las trayectorias teóricas del robot adaptándolas a la superficie real. Otras mejoras pueden ser planeadas apuntando a la automatización del proceso completo, tales son el caso de las operaciones de cambio de herramienta y el posicionamiento del rodete, pues en ambas es requerida la intervención humana, mermando los positivos resultados del uso de manipulador robótico industrial.

Referencias

(1) Represa Three Gorges en China. https://www.britannica.com/topic/Three-Gorges-Dam

(2) Primera central eléctrica Chile http://www.memoriachilena.cl/602/w3-article-611.html#presentacion

(3) Matriz energética nacional 2016 http://www.ingenieros.cl/wp-content/uploads/2017/06/20170607Politica_y_prospectiva_energetica_para_los_proximos_a_os.pdf

(4) Central hidroeléctrica Alfalfal https://www.aesgener.cl/Lists/Centrales/DispForm.aspx?ID=2

(5) Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas. Segunda edición. Claudio Mataix. Cap. 22.

(6) Patente turbina Pelton http://www.freepatentsonline.com/result.html?sort=relevance&srch=top&query_txt=pelton+runner+grinding&submit=&patents=on.

(7) Gerhard Posch, Kalchgruber Ferdinand, Hackl Heinz MANUFACTURING OF TURBINE BLADES BY SHAPE GIVING CMT-WELDING. Nov 2014.

(8) David Appleyard. Welding Pelton Runners. Hydro Review Worldwide. Ene.2012

(9) Thapa and Brekke. Efecto del tamaño en separación de partículas. 2004

(10) Esmeril recto alta frecuencia https://www.hahn-kolb.de/FEIN-high-frequency-straight-grinder-MSho849-1Z-300-Hz-200-V/72001041.sku/en/US/EUR/

(11) Funcionamiento sensor anticolisión activación neumática https://www.ati-ia.com/es-MX/products/collision_sensor/collision_sensor_description.aspx