

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE ASUNCIÓN**

**Facultad de Ciencias Químicas**

Maestría en Ingeniería Química con énfasis en Procesos Químicos



**Optimización multiobjetivo de un secador rotatorio utilizando algoritmos evolutivos**

por

**César Miguel Oviedo Salinas**

Trabajo de tesis presentado como parte de los requisitos para el grado de Máster en Ingeniería Química

Tutor: Benjamín Barán Cegla, Ph.D.

Co-tutor: Michel Osvaldo Galeano Espínola, Ph.D.

San Lorenzo - Paraguay

2021

*Dedicatoria*

*A mis padres, hermanas y sobrinos.*

*En memoria de la Profesora Ana Carolina Krayacich (†)*

*En memoria del Ing. Quím. Joel Santiago Torres Alfonso (†)*

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Prof. Dr. Benjamín Barán porque sin sus recomendaciones y orientaciones este trabajo no hubiese sido posible.

Al Prof. Dr. Michel Galeano por su constante apoyo.

A la señora rectora de la Universidad Nacional de Asunción Prof. Dra. Zully Vera de Molinas.

## **AGRADECIMIENTOS INSTITUCIONALES**

A la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Nacional de Asunción..

Al Consejo Nacional de Ciencias y Tecnologías (CONACYT), puesto que la Maestría en Ingeniería Química con énfasis en procesos químicos es el proyecto POSG 16-02 financiado por la mencionada institución.

## TABLA DE CONTENIDOS

	Página
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1.1. Antecedentes . . . . .	3
1.2. Justificación . . . . .	5
1.3. Objetivo general . . . . .	7
1.4. Objetivos específicos . . . . .	7
<b>2. REVISIÓN DE LA LITERATURA</b>	<b>8</b>
2.1. Definiciones básicas y conceptos de optimización multiobjetivo . . . . .	8
2.2. Algoritmos de optimización multiobjetivo . . . . .	11
2.3. Puzolanas y secadores . . . . .	15
2.3.1. Clasificación de las puzolanas . . . . .	16
2.3.2. Depósitos de puzolanas en el Paraguay . . . . .	18
2.3.3. Clasificación de los secadores . . . . .	19
2.3.4. Secadores rotatorios . . . . .	20
<b>3. METODOLOGÍA</b>	<b>23</b>
3.1. Objetivos de la optimización multiobjetivo . . . . .	24
3.1.1. Humedad de la puzolana a la salida del secador ( $f_1$ ): . . . . .	24
3.1.2. Calor cedido por el secador rotatorio al ambiente ( $f_2$ ): . . . . .	26
3.1.3. Costos operativos ( $f_3$ ): . . . . .	27
3.1.4. Costo de mantenimiento del secador rotatorio ( $f_4$ ): . . . . .	28
3.2. Modelo Estático . . . . .	28
3.2.1. Modelo Matemático del secador rotatorio de puzolana en corriente directa . . . . .	29

---

3.2.2. Planteamiento matemático del modelo estático . . . . .	31
3.3. Modelo semi-dinámico . . . . .	32
<b>4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>37</b>
4.1. Resultados y discusión referentes a la optimización multiobjetivo en estado estacionario . . . . .	37
4.2. Resultados y discusión referentes a la optimización multiobjetivo en estado semi-dinámico . . . . .	40
<b>5. CONCLUSIONES</b>	<b>42</b>
<b>Referencias</b>	<b>43</b>

---

## LISTA DE FIGURAS

2.1. Mapeo desde el espacio de las variables de decisión hacia el espacio de las funciones objetivos. (Fuente: adaptado de Toolbox). . . . .	9
2.2. Conjunto de soluciones no dominadas. (Fuente: adaptado de Toolbox).	10
2.3. Funcionamiento de un algoritmo genético. (Fuente: obtenido de Rivero et al.). . . . .	13
2.4. Diagrama de fase ternario $SiO_2-CaO-Al_2O_3$ . (Fuente: Santamaría,1983). . . . .	17
2.5. Diagrama simplificado de un secador rotatorio de corriente directa. (Fuente: adaptado de Mujumdar). . . . .	20
3.1. Diagrama del secador y el quemador de la unidad del proceso de secado.	30
3.2. Secador rotatorio para puzolana. Fuente: INC(2020) . . . . .	30
3.3. Quemador de biofuel. Fuente: INC(2020) . . . . .	30
3.4. Variación de la temperatura ambiente en un día (Fuente: Elaboración propia). . . . .	32
3.5. Variación de la demanda en un día (Fuente: Elaboración propia). . . . .	34
4.1. Resultados de la optimización multiobjetivo en coordenadas paralelas.	38
4.2. Esquema de los resultados obtenidos en la optimización multiobjetivo en coordenadas paralelas. . . . .	41

## LISTA DE TABLAS

1.1. Optimización multiobjetivo en ingeniería química. <i>Adaptado de: (Bhaskar et al., 2000)</i> . . . . .	5
1.2. Resumen de los artículos relevantes en revistas sobre MOO en aplicaciones en Ingeniería Química. <i>Adaptado de Rangaiah (2013)</i> . . . . .	6
4.1. Datos del proceso de secado de puzolana . . . . .	37
4.2. Resultados de la optimización multiobjetivo en estado estacionario para un horario determinado . . . . .	39
4.3. Comparación del proceso real con el proceso optimizado . . . . .	40

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Símbolos

$\beta$  Coeficiente de proporcionalidad

$C_{ei}$  Costo de la energía eléctrica en el  $i$ -ésimo intervalo, [US\$/KWh]

$C_{zi}$  Costo unitario del combustible, [US\$/KWh]

$C_{pa}$  Calor específico de los gases de combustión, [kJ/kg°C]

$D$  Diámetro del secador, [m]

$F$  Caudal másico de los gases de combustión a la salida del quemador, [kg/s]

$f_1$  Humedad de la puzolana a la salida del secador rotatorio, [kg H<sub>2</sub>O/kg totales]

$f_2$  Calor cedido por el secador rotatorio hacia el ambiente, [W]

$f_3$  Costo operativo total, [US\$]

$f_4$  Costo de mantenimiento, [—]

$f_n$   $n$ -ésima función objetivo

$F_o$  Caudal másico del aire de entrada al quemador, [kg/s]

$F_s$  Caudal másico de puzolana sólida en el secador rotatorio, [kg/s]

$F_{s_k}$  Demanda de la puzolana en el intervalo  $k$ -ésimo, [Kg/s]

$F_{s_T}$  Demanda total diaria de puzolana seca, [Kg/día]

$i$  Intervalo de tiempo del período de optimización

$K$  Constante del proceso obtenido experimentalmente, [ $W/m^2\text{ }^\circ C$ ]

$k$  Intervalo de optimización de 1 hora

$L$  Longitud del secador, [m]

$M$  Masa de puzolana en el secador rotatorio, [kg]

$m$  Variables de decisión

$N_i$  Velocidad de rotación en el  $i$ -ésimo intervalo, [rpm]

$q$  Coeficiente adimensional para la función de costos operativos

$R_w$  Velocidad de producción de agua, [kg/h]

$t_{op}$  Tiempo operativo, [s]

$T$  Temperatura de entrada de los gases de combustión al secador, [ $^\circ C$ ]

$T_o$  Temperatura ambiente, [ $^\circ C$ ]

$T_{o_k}$  Temperatura ambiente en el  $k$ -ésimo intervalo de tiempo, [ $^\circ C$ ]

$W$  Masa del secador rotatorio, [kg]

$x_1$  Velocidad de rotación, [rpm]

$x_2$  Temperatura de los gases de combustión a la entrada del secador rotatorio, [ $^\circ C$ ]

$x_3$  Flujo másico del combustible utilizado en el quemador, [Kg/s]

$x_4$  Flujo másico del aire en la entrada del quemador, [Kg/s]

$x_n$   $n$ -ésima variable de decisión

$X_o$  Humedad de la puzolana en la entrada del secador, [kg  $H_2O$ /kg]

$y$  Humedad absoluta de los gases de combustión en la entrada del secador rotatorio, [kg  $H_2O$ /kg AS]

---

$y_a$  Humedad absoluta de los gases de combustión en la salida del secador rotatorio,  
[kg  $H_2O$ /kg AS]

$y_o$  Humedad absoluta del aire en la entrada del quemador, [kg  $H_2O$ /kg AS]

$Z$  Caudal másico del combustible, [kg/h]

### **Siglas y Acrónimos**

AE Algoritmos Evolutivos

AGs Algoritmos Genéticos

AS Aire Seco

DMH Dirección de Meteorología e Hidrología

FCQ Facultad de Ciencias Químicas - Universidad Nacional de Asunción

FIUNA Facultad de Ingeniería - Universidad Nacional de Asunción

FP-UNA Facultad de Politécnica - Universidad Nacional de Asunción

INC Industria Nacional del Cemento

MOO *Multi-Objective Optimization*

MOOP *Multi-Objective Optimization Problem*

MOPC Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones

NSGA-II *Elitist Nondominated Sorting Genetic Algorithm -II*

### **Subíndices**

$a$  Gases de combustión

$o$  Condición en la entrada al quemador

$s$  Puzolana sólida

$w$  Vapor de agua

---

# Capítulo 1

## INTRODUCCIÓN

El estudio de un secador rotatorio dentro de la industria química es relevante debido a las múltiples sustancias químicas que pueden ser tratadas o acondicionadas. Por ende, la optimización de los parámetros funcionales de un secador rotatorio se traduce en la industria como un consumo menor de materia prima, energía y una mayor rentabilidad económica del proceso productivo.

Este trabajo apunta a mejorar los parámetros operativos del secador rotatorio de la Industria Nacional del Cemento del Paraguay, a fin de reducir los costos operativos, el contenido de humedad en la puzolana a la salida del secador rotatorio y la emisión de calor al medio ambiente por parte del secador en un modelo estático, añadiendo luego un objetivo más como es el costo de mantenimiento en un modelo semi-dinámico.

En un ambiente mono-objetivo, es decir, donde es posible combinar los objetivos a ser optimizados, el problema de optimización se reduce a la búsqueda de un máximo o de un mínimo que es la solución del problema. Cuando no es posible combinar los objetivos, o bien si estos objetivos se contraponen, no existe una única solución al problema, sino un conjunto de soluciones (von Lüken et al., 2004), esto se conoce como Problema de Optimización Multiobjetivo (*Multi-Objective Optimization Problem - MOOP*).

En los últimos años, los Algoritmos Genéticos (AGs) han sido popularmente utilizados para la resolución de MOOP, como herramienta de búsqueda y optimización, de fácil uso (Ramírez, 2003).

Este trabajo está organizado de la siguiente manera; en el Capítulo 2 se dan las definiciones necesarias para abordar la optimización multiobjetivo y se presentan los tipos de Algoritmos Multiobjetivos utilizados en los MOOP. Además, se describen los tipos de puzolanas y los secadores usados en la industria del cemento. En el Capítulo 3 se describe la metodología utilizada para resolver el problema de optimización multiobjetivo, además de formalizar matemáticamente el problema del secado de puzolana, en dos modelos; uno estático y otro en un contexto semi-dinámico. El Capítulo 4 muestra los resultados de la optimización multiobjetivo y una discusión sobre los mismos. Por último, en el Capítulo 5 se detallan las conclusiones del trabajo.

---

## 1.1. Antecedentes

Douglas et al., 1993, realizaron una simulación en estado transitorio de un secador rotatorio que procesa cristales de azúcar y obtuvieron respuestas dinámicas de los perfiles de humedad y temperatura para el proceso teniendo como entrada una función escalón para ambos casos.

El diseño y operación de los secadores convectivos en el cual se incluye los secadores rotatorios fue estudiado por Kiranoudis et al., 1996, evaluando los parámetros operacionales de cada secador en términos del costo anual total. Lobato et al., 2012, usaron técnicas de optimización multiobjetivo del tipo *Firefly Algorithm* (FA) para la estimación de parámetros de la cinética de secado y calcularon los coeficientes de pérdida de calor para una planta piloto de un secador rotatorio que procesa superfosfatos.

Alvarez Laguna, 2014, realizó el diseño óptimo de los parámetros físicos característicos de un secador rotatorio que procesa puzolana, mejorando la reducción en el contenido de humedad de la puzolana en un porcentaje menor o igual al 6%. De este modo, se logró aumentar la capacidad de producción de una planta industrial cementera.

Miranda, 2016, mejoró la capacidad de producción de una planta industrial cementera boliviana, mediante el uso del software *Design Expert*, minimizando la pérdida de calor con el ambiente del secador rotatorio de puzolana y minimizando el contenido de humedad de la puzolana.

La optimización multiobjetivo de un secador rotatorio en contracorriente para el secado de fertilizantes del tipo superfosfatos simples, fue propuesto por Silveira et al., 2017. En este trabajo, mediante algoritmos de Evolución Diferencial (ED) y un modelo robusto, obtuvieron las mejores condiciones de operación del secador, minimizando el calor perdido por las paredes del secador rotatorio y minimizando el contenido de humedad al final de la longitud del secador, a través de la determinación de la temperatura inicial del aire en la entrada del secador, de la velocidad del aire y del flujo másico de los sólidos.

---

Shene et al., 1996, modelaron y simularon un secador rotatorio de contacto directo que procesa productos alimenticios, específicamente pescado y soja; en este trabajo, utilizaron una distribución espacial de la humedad y de la temperatura, tanto para los gases de secado como para el sólido a secar, proponiendo un conjunto de cuatro ecuaciones diferenciales, considerando además la cinética del secado y el tiempo de residencia, logrando así obtener los perfiles de temperatura y humedad del aire y de los sólidos, conforme avanza la longitud del secador.

### **Antecedentes de la optimización multiobjetivo en la Ingeniería Química**

Bhaskar et al. 2000, compilaron las diferentes investigaciones en optimización multiobjetivo con aplicación a procesos que involucran industrias químicas, como se muestra en la Tabla 1.1.

La Tabla 1.2 muestra un resumen elaborado por Rangaiah (2013) de las principales áreas de investigación sobre la Optimización Multiobjetivo (*Multi-Objective Optimization-MOO*) en Ingeniería Química y el número de artículos científicos publicados en los últimos años.

Tabla 1.1. Optimización multiobjetivo en ingeniería química. *Adaptado de: (Bhaskar et al., 2000)*

Descripción del problema	Autores
Optimización multicriteria en Ingeniería Química	Seinfeld and MacBride, 1970
Procesos óptimos en sistemas de síntesis	Nishida, et al., 1974
Diseño de un evaporador de múltiples efectos	Nishitani, et al., 1979
Aireación de tanques para tratamiento de agua	Nishida, et al., 1980
Síntesis óptima en procesos de metanación	Shieh & Fan, 1980
Procesos de Tolueno-Vapor en procesos de desalquilación	Umeda, et al., 1980
Modelado de industrias petroquímicas	Sophos, et al.,1980
Diseño de procesos con aspectos dinámicos	Lenhoff & Morari,1982
Complejos químicos	Grossmann, et al.,1982
Módulo controlador multivariable	Meadowcraft et al.,1992
Síntesis en destilación binaria	Lyuben & Floudas,1994
Sistema Reactor-Separador-Reciclo	Lyuben & Floudas,1994

## 1.2. Justificación

Santamaría, 1983, menciona en un análisis realizado sobre la crisis energética y la industria cementera, tres aspectos en los cuales centrarse para obtener un ahorro energético: (1) las materias primas utilizadas, (2) la tecnología empleada en el proceso productivo y (3) la adiciones activas al cemento portland. En este sentido, el trabajo se centra en los aspectos (2) y (3) de lo expuesto anteriormente, puesto que usa tecnologías de vanguardia para la optimización del secadero de puzolana.

Tabla 1.2. Resumen de los artículos relevantes en revistas sobre MOO en aplicaciones en Ingeniería Química. *Adaptado de Rangaiah (2013).*

Periodo	Número de artículos en revistas	Áreas de mayor aplicación de la MOO	Referencia
Antes del año 2000	≈30	Diseño de procesos y control, ingeniería de las reacciones químicas, ingeniería bioquímica, tratamiento de agua y control de la polución, procesos electroquímicos.	Bashkar, et al. (2000)
Del 2000 hasta mitad del 2007	≈100	Diseño de procesos y operación, refinería de petróleo y petroquímica, biotecnología y tecnología de alimentos, farmacéutica y polimerización	Masduzzaman and Rangaiah (2009)
Del 2007 hasta mitad del 2012	≈ 230	Diseño de procesos y operación, refinería de petróleo, petroquímica, polimerización, generación de potencia, control de la polución, energía renovables, producción de hidrógeno, celdas de combustibles.	Rangaiah (2013)

La presente tesis propone principalmente la mejora de los parámetros funcionales del secador rotatorio de puzolana de la Industria Nacional de Cemento (INC) a fin de optimizar su funcionamiento.

Desde el punto de vista social y ambiental, una mejora de los parámetros operativos del secador rotatorio de puzolana reduciría la emisión de polvos a la atmósfera, una cuestión de controversia actual entre la población de Villeta y la entidad estatal <sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Disponible en: <https://www.abc.com.py/edicion-impresia/economia/por-el-polvo-de-inc-hay-emergencia-ambiental-1788441.html>, consultado el 28/09/2019 a las 18:43 h.

<sup>2</sup>Disponible en: <https://www.abc.com.py/nacionales/2020/01/21/se-incendia-parte-de-la-planta-de-la-inc-en-villeta/>, consultado el 16/02/2020 a las 22:00 h.

Desde el punto de vista académico, este trabajo resulta pionero en lo relativo a la optimización multiobjetivo en la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Nacional de Asunción, si bien ya se han tratado temas sobre Algoritmos Evolutivos (AE) e Inteligencia Artificial (IA), en los trabajos de Santiviago Petzold, 2018, por ejemplo, conjuntamente con la Universidad de la República - Uruguay. En la Facultad de Ingeniería y la Facultad de Politécnica de la Universidad Nacional de Asunción, la optimización multiobjetivo es un tema central de investigación, destacándose los trabajos de Barán et al., 2001, 2005; von Lücken et al., 2004, entre otros.

### **1.3. Objetivo general**

Optimizar la operación de un secador rotatorio de corriente directa que procesa puzolana en condiciones estáticas y semi-dinámicas usando técnicas de algoritmos evolutivos en un contexto puramente multiobjetivo.

### **1.4. Objetivos específicos**

- Definir los conceptos utilizados en la optimización multiobjetivo.
  - Utilizar un modelo estático para la optimización multiobjetivo de un secador de puzolana.
  - Utilizar un modelo semi-dinámico para la optimización multiobjetivo de un secador de puzolana.
  - Validar los modelos estáticos y semi-dinámicos presentados mediante el uso de los datos del proceso real del secado de puzolana.
  - Proponer soluciones a los problemas modelados utilizando algoritmos evolutivos.
-

## Capítulo 2

### REVISIÓN DE LA LITERATURA

En este capítulo se presentan los conceptos y fundamentos necesarios para entender la metodología empleada en la tesis. Se comienza describiendo las definiciones pertinentes a una optimización multiobjetivo y los algoritmos evolutivos utilizados en la optimización multiobjetivo en la Ingeniería Química. Por último, se describen los diferentes tipos de puzolanas y las principales disposiciones de los secadores usados en la industria del cemento.

#### 2.1. Definiciones básicas y conceptos de optimización multiobjetivo

Formalmente, una optimización multiobjetivo (*Multi-Objective Optimization-MOO*), se refiere a la optimización simultánea (de minimización o maximización) de dos o más funciones objetivos, donde algún objetivo podría entrar en conflicto con otro (Rangaiah, 2013). El problema de optimización se establece como sigue:

$$\text{Optimizar } < f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x) > \quad (2.1)$$

Sujeto a:

$$g_i(x) \leq 0 \quad i = 1, 2, \dots, n_i$$

$$h_i(x) = 0 \quad i = 1, 2, \dots, n_e \quad (2.2)$$

$$x_l < x < x_u$$

donde  $n$  representa al número de objetivos a ser optimizados simultáneamente,  $x$  es un vector de  $m$  variables de decisión (continuos o discretos) con valores límites; *lower* ( $x_l$ ) y *upper* ( $x_u$ ), mientras que  $n_i$  y  $n_e$  son el número de restricciones en forma de inecuaciones ( $g$ ) e igualdades ( $h$ ), respectivamente. El espacio factible,  $\Omega$  es un conjunto de vectores de  $x$  que satisfacen todas las restricciones y límites dados por (2.2). La imagen de los vectores de  $x$  crea el espacio de objetivo, simbolizado con la letra  $\Lambda$ , representado en la Figura 2.1 para dos dimensiones ( $n = m = 2$ ) (Zitzler & Thiele, 1999).

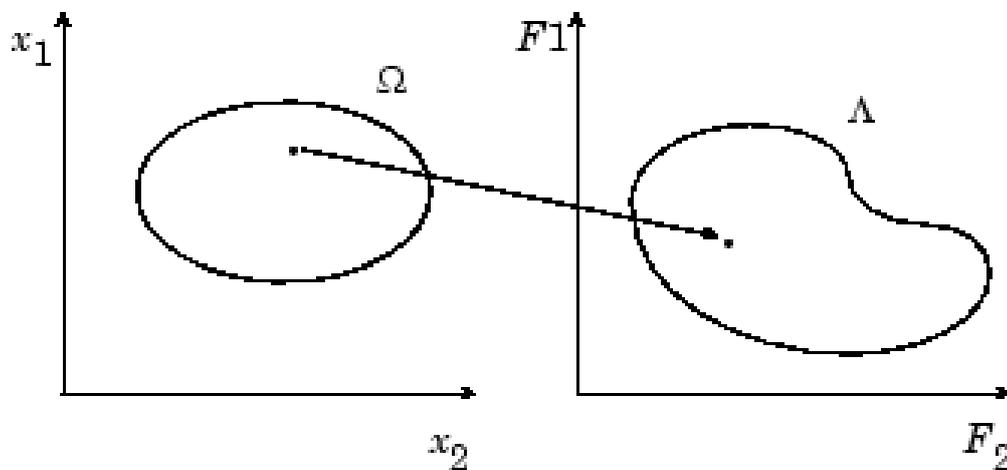


Figura 2.1. Mapeo desde el espacio de las variables de decisión hacia el espacio de las funciones objetivos. (Fuente: adaptado de Toolbox).

### Dominancia Pareto:

Sean  $\mathbf{A}, \mathbf{B} \in \Omega$ , se dice que  $\mathbf{A}$  domina a  $\mathbf{B}$  si  $\mathbf{A}$  es igual o mejor a  $\mathbf{B}$  en todos los objetivos y estrictamente mejor en al menos un objetivo. En este caso, se dice que existe dominancia de  $\mathbf{A}$  respecto a  $\mathbf{B}$  lo que se denota como  $\mathbf{A} \succ \mathbf{B}$  ( $\mathbf{A}$  es mejor que  $\mathbf{B}$ ) von Lücken et al. (2004).

Un vector  $x^* \in \Omega$  en la región factible es Pareto óptimo, si no existe otro vector factible  $x \in \Omega$  que pudiera mejorar alguna función objetivo sin causar el detrimento simultáneo en otra función objetivo (Mujumdar, 1995; Rangaiah, 2013).

Las soluciones Pareto óptimas también se denominan soluciones no dominadas. El conjunto de soluciones no dominadas se conoce como conjunto Pareto (P) y su imagen en el espacio objetivo  $\Lambda$  se denomina Frente Pareto (FP).

En una representación bidimensional del Frente Pareto, como se muestra en la Figura 2.2, el conjunto de soluciones no dominadas se encuentra en la curva entre  $C$  y  $D$ . Los puntos  $A$  y  $B$  del gráfico representan específicamente soluciones no dominadas.  $A$  y  $B$  son claramente soluciones no dominadas porque, para que exista una mejora en la función objetivo  $F_1$ , se requiere necesariamente el detrimento del valor del otro objetivo,  $F_2$ , esto es,  $F_{1B} < F_{1A}$ ,  $F_{2B} > F_{2A}$ . Dado cualquier punto en  $\Omega$  que sea dominado, este representa un punto en el cual se puede lograr una mejora en al menos un objetivo por lo que está claro que dicho punto no tiene valor (Toolbox, 2018).

La optimización multiobjetivo, por lo tanto, tiene que ver con la generación y selección de puntos de soluciones no dominadas.

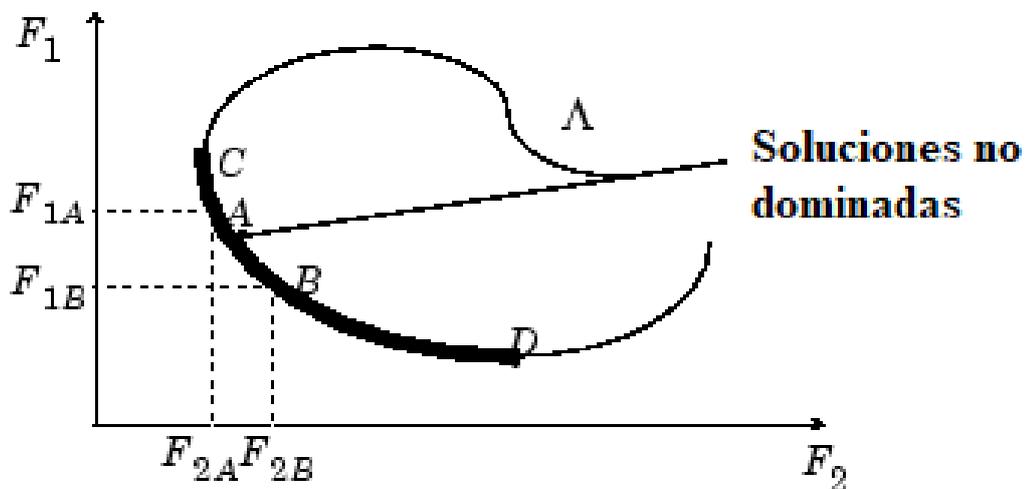


Figura 2.2. Conjunto de soluciones no dominadas. (Fuente: adaptado de Toolbox).

En este contexto, según von Lücken et al. 2004 se dan las siguientes definiciones sobre los diferentes tipos de dominancias Pareto:

### **Dominancia Pareto débil**

Un vector  $\mathbf{A} = (a_1, \dots, a_m)$  se dice que domina de forma débil a otro vector  $\mathbf{B} = (b_1, \dots, b_m)$  sí y sólo si  $\mathbf{A}$  es parcialmente mejor o igual que  $\mathbf{B}$  en cada función objetivo, esto es

$$\forall i \in \{1, \dots, m\}, F_i(A) \text{ es mejor o igual que } F_i(b)$$

Es decir,  $\mathbf{A} \succeq \mathbf{B}$ . Véase que tanto  $\mathbf{A}, \mathbf{B} \in \Omega$

### **Dominancia Pareto estricta**

Un vector  $\mathbf{A} = (a_1, \dots, a_m)$  se dice que domina de forma estricta a otro vector  $\mathbf{B} = (b_1, \dots, b_m)$  sí y sólo si  $\mathbf{A}$  es mejor que  $\mathbf{B}$  para todos los objetivos considerados, esto es

$$\forall i \in \{1, \dots, m\}, F_i(A) \text{ es mejor que } F_i(B)$$

Es decir,  $\mathbf{A} \succ \mathbf{B}$ . Véase que tanto  $\mathbf{A}, \mathbf{B} \in \Omega$

## **2.2. Algoritmos de optimización multiobjetivo**

Los Algoritmos Evolutivos (AE) han demostrado ser especialmente adecuados para la optimización multiobjetivo (von Lücken et al., 2004). Los algoritmos evolutivos multiobjetivos son una alternativa práctica en la búsqueda de soluciones de compromiso para problemas reales donde los métodos exactos son inaplicables o ineficientes (Barán et al., 2005).

Los algoritmos evolutivos son algoritmos de búsqueda y optimización que simulando la evolución Darwiniana, intentan reproducir las características de robustez y simplicidad existentes en la naturaleza para evolucionar hacia mejores soluciones en problemas computacionales (von Lücken et al., 2004). A continuación se describen algunos tipos de algoritmos multiobjetivos usados para resolver los MOOP:

## Algoritmos genéticos

El algoritmo genético es usado para resolver problemas de optimización, siendo un subconjunto de los algoritmos evolutivos (Kutz, 2013). El principio es bastante sencillo y refleja lo que ocurre en la evolución o las mutaciones genéticas. En particular, se obtiene un conjunto de soluciones factibles, que atiende ciertas restricciones, evaluando una función objetivo. En el lenguaje de algoritmos genéticos, la función objetivo da origen a una *función de aptitud*. La idea es mantener soluciones con los mejores valores de la función objetivo y modificarlas para intentar hacerla aún mejor. Así, las modificaciones beneficiosas, se mantienen, mientras que las modificaciones que producen un mal desempeño se desechan; es decir, se aplica la supervivencia del más apto. Este proceso se repite a través de un número prescrito de iteraciones, o generaciones, con la idea de que se generan mejores valores de la *función de adaptación* a través de un proceso evolutivo que incluye selección de ancestros, cruzamiento y mutación (Kutz, 2013; von Lüken et al., 2004).

Rivero et al., 2010, mencionan que cualquier solución puede ser representada por una serie de parámetros. El conjunto de todos los parámetros o *genes*, en el lenguaje de algoritmo genético, se codifica en una cadena de valores denominada *cromosoma*.

El conjunto de parámetros representado por un cromosoma particular recibe el nombre de *genotipo*. El genotipo contiene la información necesaria para la construcción del organismo, es decir, la solución real al problema. Se asigna un determinado número de bits a cada parámetro y se realiza una discretización de la variable representada por cada gen. El número de bits asignados dependerá del grado de ajuste que se desee alcanzar. Cada uno de los bits pertenecientes a un gen suele recibir el nombre de *alelo*.

El funcionamiento genérico de un Algoritmo Genético se detalla en la Figura 2.3

La estrategia elitista consiste en que los mejores individuos de cada generación se copia para evitar su pérdida. A continuación empieza a generarse la nueva población, en base al cruce de soluciones. Una vez generados los nuevos individuos se realiza la mutación con una probabilidad  $P_m$ . La probabilidad de mutación generalmente es baja, en general del 0.5 % a 2 % (Rivero et al., 2010).

---

Los criterios de parada más comunes son:

- La población ha convergido.
- Se ha alcanzado el número de generaciones máximo especificado.
- Los mejores individuos de la población, representan soluciones suficientemente buenas para el problema que se desea resolver.

```
Inicializar población actual aleatoriamente
MIENTRAS no se cumpla el criterio de terminación
  crear población temporal vacía
  SI elitismo: copiar en población temporal mejores individuos
  MIENTRAS población temporal no llena
    seleccionar padres
    cruzar padres con probabilidad  $P_c$ 
    SI se ha producido el cruce
      mutar uno de los descendientes (prob.  $P_m$ )
      evaluar descendientes
      añadir descendientes a la población temporal
    SINO
      añadir padres a la población temporal
  FIN SI
FIN MIENTRAS
aumentar contador generaciones
establecer como nueva población actual la población temporal
FIN MIENTRAS
```

Figura 2.3. Funcionamiento de un algoritmo genético. (Fuente: obtenido de Rivero et al.).

### **Algoritmos basados en gradientes**

Una alternativa a los algoritmos genéticos, mencionado por Vandervoort (2011) son los algoritmos basados en gradientes. Estos algoritmos basados en gradiente se relacionan con la optimización del descenso más pronunciado para un problema de minimización. Se puede mover una población inicial de puntos más cerca hacia el dominio Pareto, determinando la dirección del descenso más pronunciado. Se realiza además un cambio en las variables inicial de tal manera que se mejore las funciones objetivos. Estos algoritmos mueven las soluciones hacia el dominio Pareto, pero las funciones de salida no está explícitamente determinada en dirección (Vandervoort, 2011).

### **Método de las restricciones $\varepsilon$**

Se Esta aproximación es uno de los métodos más populares en la resolución de MOOP (Bhaskar et al., 2000). En esta técnica se optimiza una sola función (eligiendo una entre las originales), es decir, se reduce el problema de MOO a una optimización mono-objetivo, el resto de las funciones objetivos se tratan como restricciones acotadas dentro de ciertos niveles permisibles  $\varepsilon_i$  (von Lüken et al., 2004). Este método tiende a encontrar soluciones débilmente dominadas por lo que no será utilizada en este trabajo. En forma general, los algoritmos clásicos no son necesariamente confiables cuando se tratan temas de azar o incertezas.

### ***Strength Pareto Evolutionary Algorithm (SPEA)***

Este método está muy relacionado con los AGs (Sotelo et al., 2001). El SPEA preserva la diversidad de la población, incorpora el concepto de elitismo a través del almacenamiento de las soluciones no dominadas en una población externa, la cual participa del proceso de selección (von Lüken et al., 2004). Además, este método usa un procedimiento de *clustering* para reducir el conjunto de no dominadas sin destruir sus características (Sotelo et al., 2001).

---

### **NSGA-II - *Nondominated Sorting Genetic Algorithm II***

Este algoritmo, actualmente el principal en términos de referencia en la literatura, propone un procedimiento para clasificar a los individuos de la población en varios frentes no dominados. El NSGA-II incorpora un mecanismo de preservación de elites que asegura el mantenimiento de las buenas soluciones encontradas con anterioridad. El NSGA-II es el algoritmo evolutivo que será utilizado para la resolución de la optimización multiobjetivo de este trabajo, el mismo usa un procedimiento rápido de clasificación por no-dominancia (*fastnondominated sorting procedure*) el cual incorpora un procedimiento especial de almacenamiento a fin de reducir la complejidad computacional del algoritmo. Cabe mencionar que el NSGA-II no requiere de ningún parámetro ajustable (Deb, 2014; Giangreco & Cegla, 1993).

Las dificultades presentadas en el uso de los métodos clásicos de optimización son superadas con el uso de algoritmos evolutivos, dentro de los algoritmos evolutivos el NSGA-II presenta mejores métricas (como el Hypervolume), por ejemplo, por lo que se justifica su uso en este trabajo.

### **2.3. Puzolanas y secadores**

La puzolana es un material silicoso o silíco-aluminoso que por sí mismo puede tener poca o ninguna actividad hidráulica, pero que finamente dividido y en presencia de humedad, reacciona químicamente con el hidróxido de calcio a temperaturas ordinarias para formar compuestos que poseen propiedades hidráulicas (Alvarez Laguna, 2014).

En el caso específico de la INC, la puzolana antes de ser mezclada junto al clínker en el molino, debe ser previamente secada, para así reducir su humedad y evitar la aglomeración de las partículas pues esto dificulta la operación de la molienda.

En la industria del cemento, el secado se practica en secaderos de tambor o rotatorios, secaderos rápidos con paletas lanzadoras, secadores por choque, molienda-secado en tándem, en ciclones y en la molienda autógena (Alvarez Laguna, 2014; Duda, 1977).

---

El consumo de energía se minimiza, siempre que las operaciones de secado y molienda se realicen por separado, si el material de alimentación se ha desintegrado antes de su entrada al molino. Cabe destacar que otra desventaja de la entrada de material húmedo al molino es el hecho de disminuir el caudal específico de la molienda (Duda, 1977).

### 2.3.1. Clasificación de las puzolanas

La clasificación más comúnmente utilizada es la que se relaciona con el origen. Por ende, las puzolanas pueden ser naturales o artificiales (Santamaría, 1983). Las puzolanas naturales no requieren cambio en su composición química o mineralógica, sin embargo las puzolanas artificiales se obtienen de transformaciones químicas o mineralógica de materiales de partida con características puzolánicas débiles.

#### **Puzolanas Naturales**

Según la clasificación que menciona Santamaría 1983, las puzolanas naturales pueden ser:

- **Rocas piroclásticas:** Estas rocas surgen de erupciones volcánicas explosivas, depositándose en los alrededores del volcán, se destacan las cenizas, la pómez, la escoria y las bombas (materiales densos).
  - **Materiales de origen clástico:** Manifiestan la capacidad de fijar cal, donde se destacan las arcillas y las tierras de diatomeas. Los materiales arcillosos se descartan como materiales puzolánicos por su efecto de reducir la resistencia en las mezclas.
  - **Materiales de origen mixto:** Puede estar compuesta de materiales volcánicos, sedimentario y orgánico, en esta categoría se encuentran la tierra de Sacrofano y el gaize.
-

### Puzolanas Artificiales

Las puzolanas artificiales son materiales que adquieren propiedades puzolánicas por un tratamiento térmico adecuado, que transforma profundamente su naturaleza primitiva (Santamaría, 1983).

Siguiendo con la clasificación mencionada por Santamaría 1983, las puzolanas artificiales se clasifican como sigue:

- **Arcillas y esquistos calcinados:** Los materiales arcillosos que son inerte en principio, presentan actividad puzolánica aceptable cuando se calcinan a temperatura comprendida entre los  $600^{\circ}\text{C}$  y  $900^{\circ}\text{C}$  y se muelen a finura de cemento.
- **Cenizas volantes:** Son cenizas derivadas de la combustión de carbón pulverizado en centrales térmicas, las cenizas volantes vítreas, esféricas y ligeras son de interés en la industria cementera.

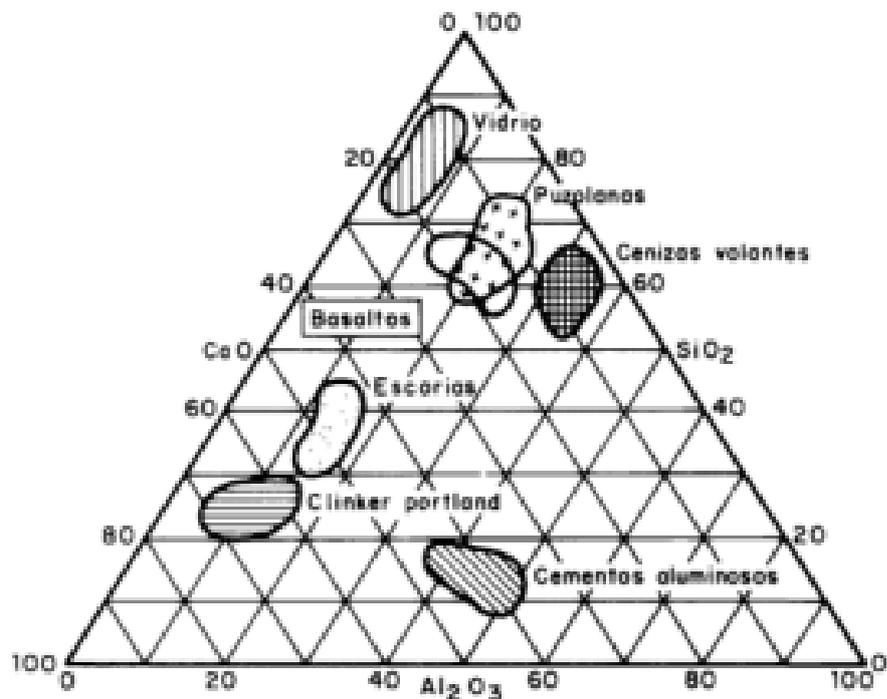


Figura 2.4. Diagrama de fase ternario  $\text{SiO}_2\text{-CaO-}\text{Al}_2\text{O}_3$ . (Fuente: Santamaría,1983).

La Figura 2.4 muestra que las puzolanas naturales de origen mineral y orgánico exhiben diferencias en su composición, las de origen mineral presentan menos sílice y más alúmina y álcalis. Por otro lado, las puzolanas artificiales, son más pobres en sílice, cal y álcalis que las naturales, mientras que resultan más ricas en alúminas y óxidos de hierro.

### 2.3.2. Depósitos de puzolanas en el Paraguay

Se destacan dos ocurrencias de materiales puzolánicos en el Paraguay<sup>1</sup> (MOPC-BGR, 1993):

- **Jurisdicción de Ybytymi sobre el arroyo Tebicuary-mi:** Se trata de la mayor explotación de puzolana existente en el Paraguay, la reserva se clasifica como muy grande. La calidad de la puzolana natural de este lugar es constantemente controlado por el laboratorio de la INC en Villeta, utilizado para la producción del *cemento puzolánico*. El cemento puzolánico se compone de 80 % de caliza con arcilla y material hematítico; 5 % de yeso y 15 % de material puzolánico.
- **Estancia Salitre - Cue jurisdicción de José Leandro Oviedo Sobre el Río Tebicuary:** La ocurrencia de material puzolánico se identifica sobre las orillas del Río Tebicuary, debido a que las planicies en la zona son extensas y suponiendo una distribución homogénea de los sedimentos puzolánicos, las reservas son clasificadas como muy grandes.

---

<sup>1</sup>Disponible en:<http://www.geologiadelparaguay.com.py/Analisis-Material-Puzolanico-Reg-Oriental.pdf>, consultado el 17/02/2020 a las 02:26 h.

---

### **2.3.3. Clasificación de los secadores**

Alvarez Laguna, 2014, propone la siguiente clasificación de los secadores:

#### **Secadores indirectos**

El calor debido al secado se transfiere al sólido húmedo a través de una pared de retención. El líquido vaporizado se separa independientemente del medio de calentamiento. La velocidad de secado depende del contacto que se establezca entre el material húmedo y las superficies calientes. Los secadores indirectos se llaman también secadores por conducción o de contacto.

#### **Secadores directos**

La transferencia de calor para el secado se logra por contacto directo entre los sólidos húmedos y los gases calientes. El líquido vaporizado se arrastra con el medio de desecación; es decir, con los gases calientes. Los secadores directos se llaman también secadores por convección.

#### **Secadores continuos**

La desecación se efectúa haciendo pasar el material de manera continua por el secador. La carga se realiza por una de las entradas del secador y se descarga ya seco por una de sus terminales.

#### **Secadores a contracorriente**

Son secadores con dirección de translación opuesta para los gases calientes y el material que se ha de secar. Los gases ingresan en el secadero en el punto donde el material lo abandona.

---

### Secadores de corriente directa

También denominados de flujo paralelo o de co-corriente. En estos secadores el flujo de entrada de los gases calientes con respecto al avance del material es en el mismo sentido. Gracias a este efecto, es posible reducir el contenido de humedad de manera controlada, ya que se puede regular los gases calientes de entrada con respecto al flujo del material. También se puede regular el valor de la humedad final del material.

#### 2.3.4. Secadores rotatorios

Los secadores rotatorios son uno de los principales métodos de secado existentes en las operaciones unitarias en Ingeniería Química (Mujumdar, 1995). El secado tiene lugar en el secador rotatorio, el cual consiste en un tambor cilíndrico con un mecanismo que le permite rotar y normalmente se dispone de forma horizontal. El material húmedo ingresa por la parte superior del secador y la carga se desplaza dentro del tambor debido a la rotación del mismo, el efecto cascada, la pendiente del tambor y los productos secos son retirados por la parte inferior del secador. Un diagrama simplificado de un secador rotatorio de corriente directa es presentado en la Figura 2.5.

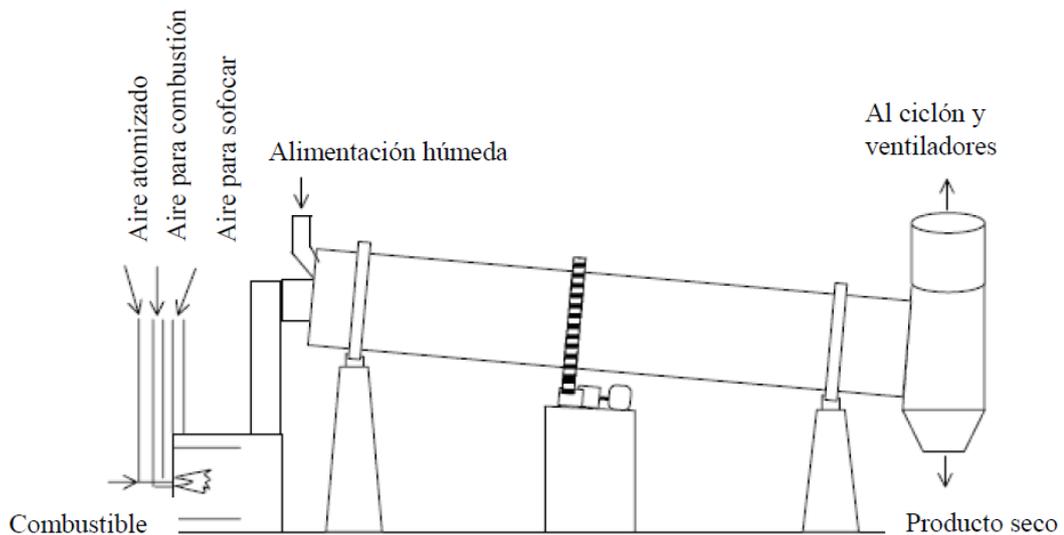


Figura 2.5. Diagrama simplificado de un secador rotatorio de corriente directa. (Fuente: adaptado de Mujumdar).

La dirección del flujo del gas a través del cilindro relativo a los sólidos es determinada principalmente por las propiedades del material procesado. El flujo en corriente directa se usa para secar materiales termosensibles, incluso a altas temperaturas, debido al rápido enfriamiento del gas durante el inicio de la evaporación de la humedad superficial, mientras que para el flujo en contracorriente es deseable para aprovechar la mayor eficiencia térmica que se puede lograr de esta manera (Mujumdar, 1995).

### **Tipos de secadores rotatorios**

Los secadores rotatorios son clasificados como directos, indirectos-directos, indirectos y especiales. Esta clasificación está basado en el método de transferencia de calor que puede ser del tipo indirecto o directo como se mencionó en la Sección 2.3.3. Mujumdar 1995, menciona que hay un número infinito de variaciones posibles de estos secadores, los cuales presentan características de operación adecuada para el secado, reacciones químicas, mezclado, recuperación de solvente, descomposición térmica, sinterizado y aglomeración de sólidos.

Entre los principales tipos de secadores rotatorios se incluyen los siguientes (Mujumdar, 1995):

- **Secador rotatorio directo:** Consiste en un cilindro de metal que puede o no llevar deflectores internos, es adecuado para operaciones en donde se requieran temperaturas medias, las cuales están definidas por los límites de trabajo del metal.
  - **Horno rotatorio directo:** Consiste en un metal cilíndrico, su interior está recubierto por ladrillos refractarios, adecuados para operaciones a altas temperaturas.
  - **Secador de tubo de vapor indirecto:** Consiste en un metal cilíndrico con una o más filas de metales instalados longitudinalmente en su interior. Resulta adecuado para operaciones donde se encuentre disponible vapor u operaciones donde requieran agua de enfriamiento.
-

- **Calcinador rotatorio indirecto:** Consiste en un metal cilíndrico rodeado por un quemador o calentador eléctrico que calienta el horno hasta la máxima temperatura permitida por el metal del cilindro, normalmente 800-1025 K para acero inoxidable y 650-700 K para acero al carbono.
  - **Secador roto-louvre directo:** Es el tipo más importante, donde los sólidos avanzan en contracorriente con respecto al movimiento del gas dentro del cilindro del metal, adecuado para operaciones a baja y media temperatura.
-

## Capítulo 3

### METODOLOGÍA

En este capítulo se presenta la metodología utilizada para la optimización multiobjetivo de un secador rotatorio de corriente directa que procesa puzolana. Esta tesis analiza dos modelos:

- uno *estático*, que resuelve el problema de optimización asumiendo conocidas tanto la demanda como la variación de la temperatura ambiente a lo largo de todo el día, sin considerar que estas variables son además estocásticas por lo que en realidad van variando aleatoriamente a lo largo del tiempo; y
- otro modelo *semi-dinámico*, donde es posible considerar los eventuales cambios de la temperatura ambiente y la demanda de puzolana que se desea satisfacer.

Esta tesis describe los pasos realizados para la obtención de datos reales de producción utilizados, la resolución de los modelos matemáticos propuestos, así como la representación de los resultados. El enfoque empleado en esta tesis es cuantitativo con alcance exploratorio-descriptivo, siendo este el primer abordaje concreto sobre la optimización multiobjetivo del secador de corriente directa de puzolana de la Industria Nacional de Cemento, considerando la minimización de tres funciones objetivo en estado estático: (1) la humedad a la salida del secador rotatorio, (2) el calor cedido hacia el ambiente y (3) el costo operativo. En estado semi-dinámico se incluye un cuarto objetivo, que es (4) el costo de mantenimiento.

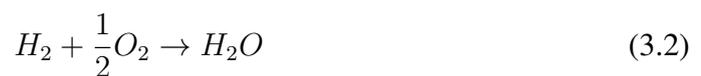
### 3.1. Objetivos de la optimización multiobjetivo

El problema multiobjetivo del secador rotatorio en corriente directa estudiado en este trabajo pretende minimizar: (1) la humedad a la salida del secador, (2) el calor que el secador cede al ambiente y (3) los costos operativos, en el caso estático, mientras que en el caso semi-dinámico se añade una función objetivo adicional, que es (4) el costo de mantenimiento del secador rotatorio.

#### 3.1.1. Humedad de la puzolana a la salida del secador ( $f_1$ ):

La humedad de la puzolana a la salida del secador debe ser mínima para que la operación de molienda (operación que sigue al secado en una planta cementera) no se vea dificultada.

El balance de materia en el quemador se detalla a continuación, asumiendo que el combustible usado es un biofuel, hidrocarburo con un calor de combustión igual a  $\Delta H_f$  [kJ/kg] y una fracción de hidrógeno  $C_H$  [kg H/kg totales] y que la reacción química de combustión es (Mujumdar, 1995):



Se producen entonces,  $9C_H$  [Kg] de vapor de agua por [Kg] de combustible Mujumdar, 1995, esto es:

$$R_w = 9C_H Z \quad (3.3)$$

donde:

$R_w$ : Velocidad de producción de agua, [kg/s].

El balance total de materia y de agua sobre el quemador se obtiene aplicando las siguientes relaciones Kiranoudis et al. (1996); Mujumdar (1995):

$$F(1 + y) = F_o(1 + y_o) + Z \quad (3.4)$$

$$Fy = F_o y_o + R_w \quad (3.5)$$

donde:

$F$ : Caudal másico de los gases de combustión a la salida del quemador, [kg/s].

$F_o$ : Caudal másico del aire de entrada al quemador, [kg/s].

$y$ : Humedad de los gases de combustión en la entrada del secador, [kg  $H_2O$ /kg AS].

$y_o$ : Humedad absoluta del aire en la entrada del quemador, [kg  $H_2O$ /kg AS].

$Z$ : Caudal másico del combustible, [kg/s].

Se asume que los gases de combustión tienen las mismas propiedades físicas que el aire, por lo tanto el balance de energía en el quemador queda como Mujumdar (1995):

$$F(1 + y)Cp_a(T - T_o) = Z\Delta H_f \quad (3.6)$$

donde:

$Cp_a$ : Calor específico de los gases de combustión, [kJ/kg°C].

$\Delta H_f$ : Calor de combustión, [kJ/kg].

$T$ : Temperatura de entrada de los gases de combustión al secador, [°C].

$T_o$ : Temperatura ambiente, [°C].

Aplicando un balance de materia total en el secador rotatorio, se obtiene la siguiente relación matemática para la humedad de salida de la puzolana Kiranoudis et al. (1996); Mujumdar (1995):

$$f_1 = X_o - \frac{F}{F_s}(y_a - y) \quad (3.7)$$

donde:

$f_1$ : Humedad de la puzolana a la salida del secador rotatorio, [ $kg H_2O/kg$  *totales*].

$F_s$ : Caudal másico de puzolana sólida en el secador rotatorio, [ $kg/s$ ].

$X_o$ : Humedad de la puzolana en la entrada del secador, [ $kg H_2O/kg$  *sólidos*].

$y_a$ : Humedad de los gases de combustión en la salida del secador, [ $kg H_2O/kg$  *AS*].

### 3.1.2. Calor cedido por el secador rotatorio al ambiente ( $f_2$ ):

La pérdida de calor del secador rotatorio al ambiente debe ser minimizado debido a tres motivos: (1) optimizar el aprovechamiento del calor cedido por el combustible para el secado de la puzolana, (2) disminuir el impacto térmico al ambiente, (3) mejorar los parámetros operativos, considerando que estas son variables independientes del problema planteado.

El calor que pierde el secador rotatorio es debido a mecanismos convectivos principalmente, y está dado por la siguiente relación matemática Douglas et al. (1993):

$$f_2 = KF^m \pi DL(T - T_o)b_i \quad (3.8)$$

donde:

$D$ : Diámetro del secador, [m].

$f_2$ : Calor cedido por el secador rotatorio hacia el ambiente, [w].

$K$ : Constante del proceso obtenido experimentalmente, [ $W/m^{2\circ} C$ ].

$L$ : Longitud del secador, [m].

$m$ : Constante adimensional del proceso de secado.

$b_i$ : Número binario que puede valer 0 o 1, según el secador esté apagado o prendido respectivamente en el intervalo  $i$ .

### 3.1.3. Costos operativos ( $f_3$ ):

Los costos operativos considerados en este trabajo incluyen los costos de la energía eléctrica consumida por el secador rotatorio y del combustible, en este caso biofuel usado en el quemador, por lo que no se consideran como variables a otros costos como los salarios de los funcionarios que operan en el sector de secado. Un factor importante es el costo de la energía eléctrica en la estructura tarifaria de la misma según Barán et al. (2005). Se considera la diferencia de precio debido a la tarifa diferenciada, que para el presente trabajo se considera como sigue:

- tarifa barata ( $C_{ef}$ ): de 0 a 17 horas, y de 22 a 24 horas., denominado horario fuera de punta de carga;
- tarifa cara ( $C_{ep}$ ): de 17 a 22 horas., llamado horario de punta de carga.

El costo operativo está determinado por la siguiente ecuación conforme Barán et al. (2005); Kiranoudis et al. (1996); Mujumdar (1995):

$$f_3 = qN_i D(M + W)C_{ei}t_{op}bi + ZC_{zi}t_{op}bi \quad (3.9)$$

donde:

$C_{ei}$ : Costo de la energía eléctrica en el  $i$ -ésimo intervalo, [US\$/KWh].

$C_{zi}$ : Costo unitario del combustible, [US\$/KWh].

$f_3$ : Costo operativo total, [US\$].

$M$ : Masa de puzolana en el secador rotatorio, [kg].

$N_i$ : Velocidad de rotación en el  $i$ -ésimo intervalo, [rpm].

$q$ : Coeficiente adimensional para la función de costos operativos.

$t_{op}$ : Tiempo operativo, [s].

$W$ : Masa del secador rotatorio, [kg].

### 3.1.4. Costo de mantenimiento del secador rotatorio ( $f_4$ ):

Generalmente el costo de mantenimiento suele ser más importante que los costos operativos (Barán et al., 2005). Se introduce el concepto de número de puestas en marcha del secador rotatorio como una forma de medir el costo de mantenimiento. Es decir, se mide de forma indirecta el costo de mantenimiento del secador por medio del número de veces que ha sido puesto en marcha. A mayor número de puestas en marcha, mayor costo de mantenimiento. Una puesta en marcha se considera como tal solo en el caso que el secador rotatorio haya estado parado en el intervalo de tiempo anterior (Barán et al., 2005).

Si el secador rotatorio ya estaba en en marcha en el intervalo anterior y continúa estándolo o se para en el intervalo siguiente, no constituye una puesta en marcha. Para determinar el número total de puestas en marcha  $f_4$  simplemente se cuenta el número de puestas en marcha en cada intervalo y a esto se suma la mitad del número de puestas en marcha entre el primer y el último intervalo; esto último, de manera a considerar las puestas en marcha que hubieran entre el día anterior y el actual, suponiendo cierta periodicidad en las programaciones. Lo explicado anteriormente puede ser expresado como:

$$f_4 = \sum_{i=1}^{24} \|\max\{0; (b_i - b_{i-1})\}\|_1 + \frac{\|\max\{0; (b_1 - b_{24})\}\|_1}{2} \quad (3.10)$$

## 3.2. Modelo Estático

El alcance del modelo estático es determinar el conjunto de solución Pareto óptimo, minimizando las funciones objetivos  $f_n(x)$  consideradas y manteniendo constantes las variables de control.

### **3.2.1. Modelo Matemático del secador rotatorio de puzolana en corriente directa**

Las siguientes consideraciones se establecen para la validez del modelo estático del secador rotatorio en corriente directa (Kiranoudis et al., 1996; Mujumdar, 1995):

- se considera que el secador y el quemador operan en estado prácticamente estacionario;
- ninguna propiedad varía con la posición en el volumen de control;
- se considera a la entalpía prácticamente independiente de la presión;
- se considera que la reacción de combustión del biofuel es completa en el quemador;
- para el cálculo del calor cedido por el secador a los alrededores sólo se considera el término convectivo, despreciándose los aportes de conducción de calor y de radiación.

El esquema del proceso a estudiar se muestra en la Figura 3.1 mientras que la Figura 3.2 y la Figura 3.3 muestran el secador rotatorio y el quemador considerado.

---

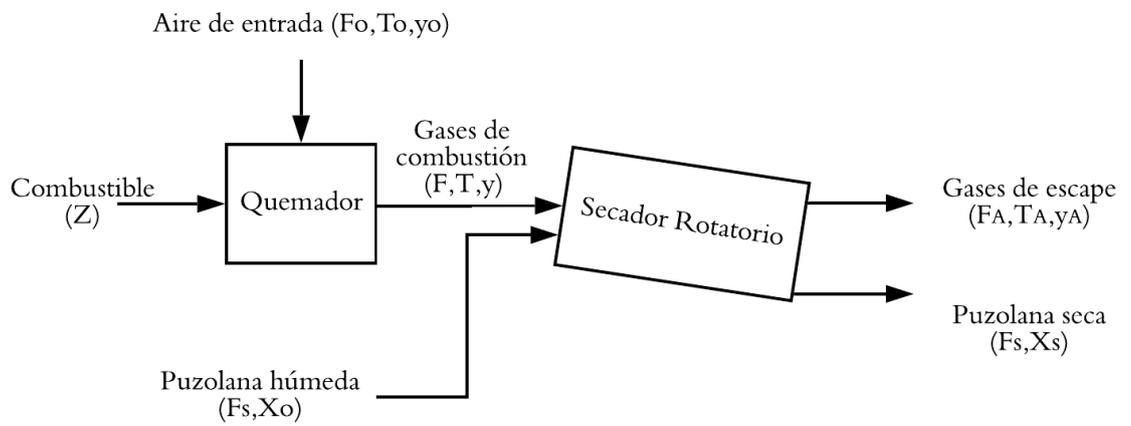


Figura 3.1. Diagrama del secador y el quemador de la unidad del proceso de secado.



Figura 3.2. Secador rotatorio para puzolana. Fuente: INC(2020)



Figura 3.3. Quemador de biofuel. Fuente: INC(2020)

### 3.2.2. Planteamiento matemático del modelo estático

$$\text{Minimizar } \mathbf{y} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) = [f_1(x), f_2(x), f_3(x)]^T$$

donde:

$$\mathbf{y} \in \mathbb{R}^3;$$

$\mathbf{x} = [x_1; x_2; x_3; x_4] \in \mathbb{R}^4$ , es el vector de las variables independientes, también denominado variables manipulables, donde:

$x_1 = N \in \mathbb{R}$ , representa la velocidad de rotación en rpm;

$x_2 = T \in \mathbb{R}$ , representa la temperatura de los gases de combustión en la entrada del secador rotatorio en °C;

$x_3 = Z \in \mathbb{R}$ , representa el caudal másico de combustible en la entrada del quemador, en kg/s;

$x_4 = F_o \in \mathbb{R}$ , representa el caudal másico de aire en la entrada del quemador en kg/s.

sujeto a:  $x_l \leq x \leq x_u$

donde:

$$x_l = [1; 600; 0,1; 10]$$

$$x_u = [10; 900; 1; 1000]$$

En resumen, en el modelo estático para un horario determinado, a una temperatura ambiente dada y una demanda específica, se hace notar que una posible solución se expresa como:

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix}$$

### 3.3. Modelo semi-dinámico

El modelo en estado semi-dinámico pretende determinar el conjunto de soluciones Pareto óptimos  $\mathbf{P}$ , minimizando la función objetivo analizada y considerando la variación temporal de la temperatura ambiente y la variación de la demanda de puzolana, en cuyo caso se requiere volver a correr el algoritmo de optimización para cada hora del día.

#### Variación de la temperatura ambiente

En la Figura 3.4 se presenta la variación de la temperatura ambiente considerada como ejemplo, a lo largo de un periodo de 24 horas. Ésta puede obtenerse por ejemplo a través de los datos del pronóstico del tiempo provistos por la Dirección de Meteorología e Hidrología<sup>1</sup> (DMH).

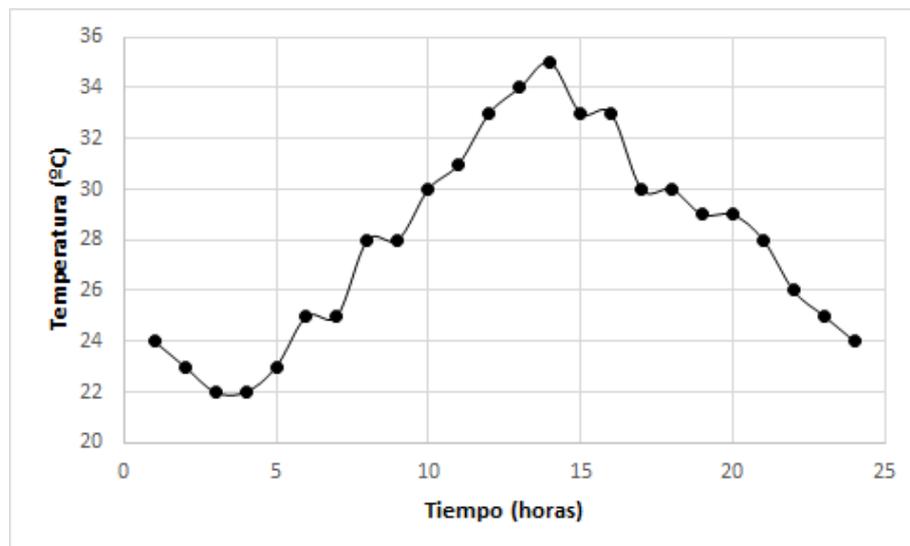


Figura 3.4. Variación de la temperatura ambiente en un día (Fuente: Elaboración propia).

<sup>1</sup><http://www.meteorologia.gov.py/>, consultado el 03/12/2019 a las 15:39 hs

### Variación de la demanda de puzolana

Empíricamente, en la INC se realiza la distribución de la demanda en función de la temperatura ambiente, es decir; los horarios en donde es mayor la temperatura ambiente conviene aumentar la carga del secador de puzolana, y a lo largo de las 24 horas satisfacer la demanda total diaria establecida por el Departamento de Producción.

La variación de la demanda sigue una distribución estocástica, es decir, expresadas según funciones de probabilidad (Scenna et al., 2015). Matemáticamente, la demanda dentro de las 24 horas se puede expresar como:

$$\sum_{k=1}^{24} F s_k = F s_T \quad (3.11)$$

donde:

$k$ : intervalo de optimización de 1 hora.

$F s_k$ : Demanda de puzolana en el intervalo  $k$  –ésimo, en  $Kg/h$ .

$F s_T$ : Demanda total de puzolana seca, en  $Kg/h$ .

Si cada demanda en un  $k$  –ésimo intervalo de tiempo es función lineal a la temperatura ambiente en dicho instante, entonces:

$$F s_1 = \beta T o_1$$

$$F s_2 = \beta T o_2 \quad (3.12)$$

...

$$F s_{24} = \beta T o_{24}$$

De las ecuaciones (3.11) y (3.12), se obtiene el coeficiente de proporcionalidad  $\beta$ , como sigue:

$$\beta = \frac{F s_T}{\sum_{k=1}^{24} T o_k} \quad (3.13)$$

donde:

$\beta$ : Coeficiente de proporcionalidad.

$T_{o_k}$ : Temperatura ambiente en el  $k$  -ésimo intervalo de tiempo, en  $^{\circ}C$ .

Por ejemplo, para satisfacer una demanda diaria de 840 toneladas de puzolana y siguiendo la distribución de la temperatura ambiente dada en la Figura 3.4, el valor puntual de  $\beta \approx 1254$ . En este caso la distribución de la demanda se muestra en la Figura 3.5.

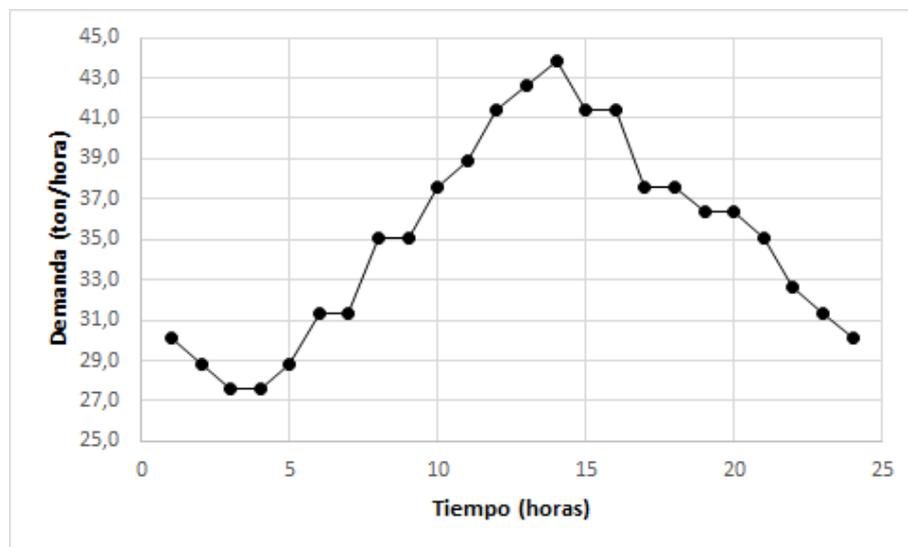


Figura 3.5. Variación de la demanda en un día (Fuente: Elaboración propia).

En un día completo se tendrán 24 simulaciones en total, una simulación para cada hora del día.

El algoritmo utilizado para obtener los datos experimentales que se muestran a continuación es el NSGA-II (Deb, 2014), con un número de generaciones igual a 400, y un tamaño de población igual a 200.

Se usó el software Matlab *R2020a*, y un ordenador con un procesador AMD E1-200 APU con Radeon (TM) DD Graphics, 1000 MHz con 2 procesadores lógicos y memoria de 4 GByte.

### Planteamiento matemático del problema formulado para el modelo semi-dinámico

$$\text{Minimizar } \mathbf{y} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) = [f_1(x), f_2(x), f_3(x), f_4(x)]^T$$

donde:

$f_1$  : humedad de la puzolana a la salida del secador rotatorio; ver ecuación (3.7).

$f_2$  : calor perdido por el secador rotatorio al ambiente; ver ecuación (3.8).

$f_3$  : costos operativos; ver ecuación (3.9).

$f_4$  : número de puestas en marcha del secador rotatorio, ver ecuación (3.10).

$$\mathbf{y} \in \mathbb{R}^4;$$

$\mathbf{x} = [x_1; x_2; x_3; x_4; x_5] \in \mathbb{R}^5$ , es el vector de las variables independientes o variables manipulables,

donde:

$x_1 = N \in \mathbb{R}$ , representa la velocidad de rotación en rpm;

$x_2 = T \in \mathbb{R}$ , representa la temperatura de los gases de combustión en la entrada del secador rotatorio en °C;

$x_3 = Z \in \mathbb{R}$ , representa el caudal másico de combustible en la entrada del quemador, en kg/s;

$x_4 = F_o \in \mathbb{R}$ , representa el caudal másico de aire en la entrada del quemador en kg/s.

$x_5 = b_i \in \{0, 1\}$  es un número binario que representa a la parada o puesta en marcha del secador rotatorio en el intervalo  $i$ .

sujeto a:  $x_l \leq x \leq x_u$

donde:

$$x_l = [1; 600; 0,1; 10; 0]$$

$$x_u = [10; 900; 1; 1000; 1]$$

En resumen, el modelo semi-dinámico tiene en cuenta la variación de la temperatura ambiente y la variación de la demanda de puzolana, a lo largo de las 24 horas del día.

Se hace notar que una solución completa para todo un día tendría la siguiente forma

$$x = \begin{bmatrix} x_1(1) & x_2(1) & x_3(1) & x_4(1) & x_5(1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_1(24) & x_2(24) & x_3(24) & x_4(24) & x_5(24) \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{24 \times 5}$$

---

## Capítulo 4

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1. Resultados y discusión referentes a la optimización multiobjetivo en estado estacionario

Luego de 254 iteraciones experimentales del algoritmo NSGA-II, se obtuvieron 18 cromosomas que resultaron ser las soluciones Pareto óptimas finales, para una temperatura ambiente de 25°C y una demanda de puzolana de 5000 kg/h. Los datos del proceso de secado en estado estacionario para realizar la corrida del algoritmo NSGA-II se detallan en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Datos del proceso de secado de puzolana

Parámetro	Valor
D (m)	2
L (m)	15
U (W/m <sup>2</sup> °C)	28.36
T <sub>o</sub> (°C)	25
q	1
C <sub>e</sub> (US\$/W)	7 * 10 <sup>-5</sup>
C <sub>z</sub> (US\$/W)	5 * 10 <sup>-5</sup>
M (kg)	1000
W (kg)	10000
C <sub>H</sub> (kg H/kg totales)	0.106
ΔH <sub>f</sub> (kJ/kg)	15 * 10 <sup>6</sup>
C <sub>p<sub>a</sub></sub> (kJ/kg°C)	1180
y <sub>o</sub> (kg H <sub>2</sub> O/kgAS)	0.01
ΔH <sub>V</sub> (kJ/kg)	2,5 * 10 <sup>6</sup>
F <sub>s</sub> (kg/s)	1.38

En la Tabla 4.2 se detallan los resultados de las variables de decisión y de las funciones objetivo para el problema de secado de puzolana en corriente directa en estado estacionario.

En la Figura 3.2 se grafican en coordenadas paralelas los valores de las funciones objetivos; en ella se pueden apreciar dos tendencias; una de ellas ejemplificada por el Cromosoma-16 que maximiza la función objetivo  $f_2$ ; y los demás 17 cromosomas restantes que minimizan la función objetivo  $f_2$  de la cual se elige al Cromosoma-10 como representante para establecer una comparación.

En la Tabla III se observa la comparación entre el proceso real y los cromosomas; específicamente el cromosoma-10 y el cromosoma-16 que son representantes de las tendencias que se observan en la Figura 4.1.

Como resultado de la comparación entre el proceso real realizado en la fábrica y el proceso optimizado se observa que el Cromosoma-16 logra mejorar todos los objetivos respecto a la operación real, reduciendo la humedad de la puzolana en 28 %, el calor cedido al ambiente en 38 % y los costos operativos en 52 %. En cambio, el Cromosoma-10 logra reducir el calor cedido en 38 %, el costo operativo en 34 %, pero proporciona una humedad 32 % mayor que el proceso real.

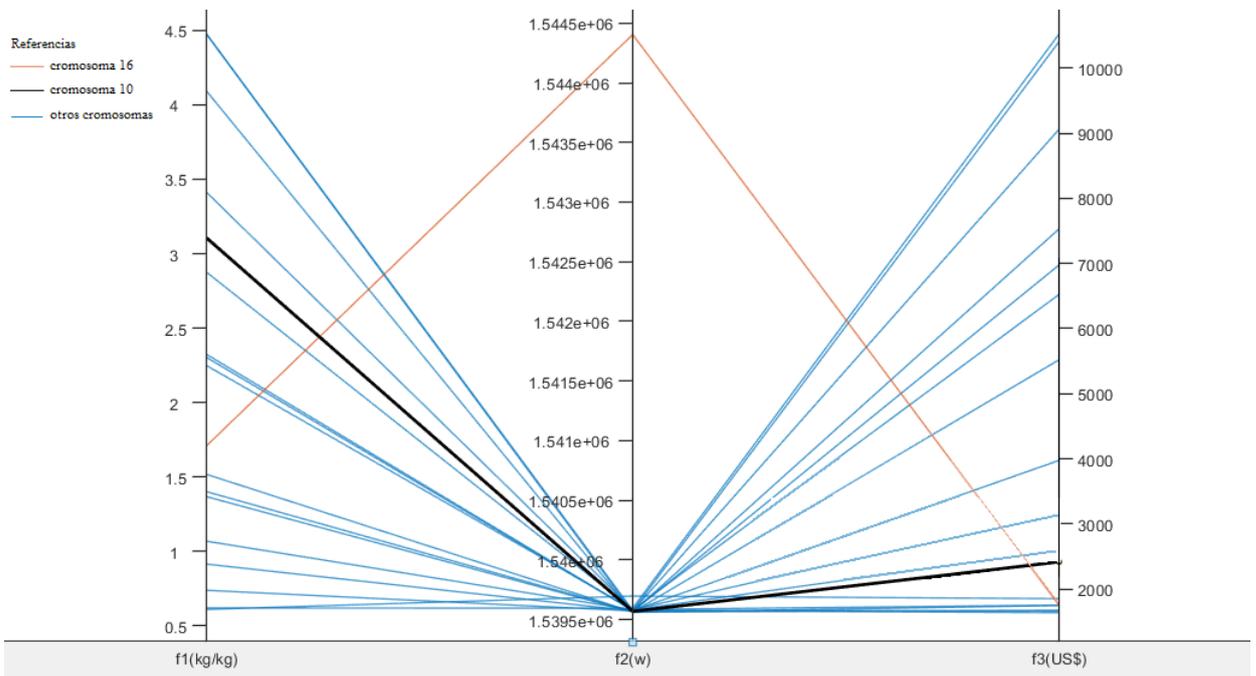


Figura 4.1. Resultados de la optimización multiobjetivo en coordenadas paralelas.

Tabla 4.2. Resultados de la optimización multiobjetivo en estado estacionario para un horario determinado

Cromosomas	valores de las variables de decisión				valores de las funciones objetivos		
	$x_1$ (rpm)	$x_2$ (°C)	$x_3$ (kg/s)	$x_4$ (kg/s)	$f_1$ (kg/k)	$f_2$ (W)	$f_3$ (US\$)
1	1.00	600.00	0.102	10.000	4.473	1,539* 10 <sup>6</sup>	1663
2	3.31	600.00	0.820	10.008	1.375	1,539* 10 <sup>6</sup>	5506
3	1.55	600.00	0.472	10.005	2.879	1,539* 10 <sup>6</sup>	2582
4	1.90	600.00	0.620	10.006	2.238	1,539* 10 <sup>6</sup>	3167
5	1.00	600.00	0.602	10.000	2.316	1,539* 10 <sup>6</sup>	1671
6	5.44	600.00	0.931	10.023	0.903	1,539* 10 <sup>6</sup>	9058
7	1.11	600.05	0.999	10.006	0.599	1,539* 10 <sup>6</sup>	1849
8	1.04	600.00	0.192	10.000	4.085	1,539* 10 <sup>6</sup>	1724
9	6.25	600.00	0.973	10.057	0.734	1,539* 10 <sup>6</sup>	10392
10	1.45	600.00	0.418	10.001	3.108	1,539* 10 <sup>6</sup>	2411
11	4.19	600.00	0.815	10.012	1.400	1,539* 10 <sup>6</sup>	6964
12	3.94	600.00	0.890	10.018	1.075	1,539* 10 <sup>6</sup>	6545
13	1.00	600.00	0.102	10.000	4.473	1,539* 10 <sup>6</sup>	1663
14	6.32	600.00	0.999	10.066	0.622	1,539* 10 <sup>6</sup>	10514
15	2.40	600.00	0.605	10.015	2.308	1,539* 10 <sup>6</sup>	4001
16	1.07	601.81	0.755	10.091	1.699	1,544* 10 <sup>6</sup>	1774
17	4.54	600.00	0.786	10.018	1.525	1,539* 10 <sup>6</sup>	7543
18	1.04	600.00	0.345	10.000	3.423	1,539* 10 <sup>6</sup>	1727

Tabla 4.3. Comparación del proceso real con el proceso optimizado

	proceso real	proceso optimizado (cromosoma-10)	proceso optimizado (cromosoma-16)
$f_1(kgH_2O/kg)$	2.36	3.11	1.69
$f_2(W)$	$2,47 * 10^6$	$1,54 * 10^6$	$1,54 * 10^6$
$f_3(US\$)$	3659	2411	1774
$x_1(rpm)$	2.20	1.45	1.07
$x_2(^{\circ}C)$	950	600	601.81
$x_3(kg/s)$	0.900	0.418	0.755
$x_4(kg/s)$	21.29	10.00	10.09

#### 4.2. Resultados y discusión referentes a la optimización multiobjetivo en estado semi-dinámico

En este caso se consideran las variaciones en el tiempo, representadas en las figuras 3.4 y 3.5, conjuntamente con los datos del secado de puzolana de la Tabla 4.1. Al resolver el problema de optimización multiobjetivo del secado en un contexto semi-dinámico, en la Figura 4.2 se muestra un esquema que simplifica los resultados obtenidos. En la Figura 4.2 se muestran los resultados obtenidos para los periodos de simulación de  $t=1$  a  $t=24$ , recordando que un día tiene 24 horas y es posible ajustar la operación del secador regularmente, en este caso, a cada hora. Se utiliza coordenadas paralelas para visualizar las 4 funciones objetivos. En las poli-líneas azules de la Figura 4.2 se minimizan las funciones objetivos de humedad a la salida del secador rotatorio ( $f_1$ ) y de costos de mantenimiento ( $f_4$ ). Por otro lado, en la Figura 4.2 se puede ver otra familia de soluciones representado por las poli-líneas de color naranja, en donde se minimizan preferentemente las funciones objetivo de emisión de calor al ambiente  $f_2$  y los costos operativos  $f_3$ .

Un operador de la INC al ingresar a su turno de trabajo podría ingresar al ordenador (donde se tiene instalado el algoritmo de optimización multiobjetivo) las proyecciones por hora de la temperatura ambiente  $T_o$  y de la demanda  $F_s$  para lo que dure su jornada laboral. El ordenador le proporcionará como información de salida: la velocidad angular a la cual debe mantener el secador rotatorio  $x_1$ , la temperatura a la cual deben ingresar los gases de combustión al secador rotatorio  $x_2$ , el caudal másico del biofuel que debe ingresar al quemador  $x_3$ , el flujo másico del aire de entrada  $x_4$  y si debe o no parar el secador rotatorio  $x_5$ , en cada intervalo de tiempo. Si existe alguna perturbación en la temperatura ambiente o en la demanda de la puzolana durante la jornada laboral, el operador deberá volver a ingresar estos nuevos datos al ordenador para obtener una solución que permita ajustar las variables de decisión ( $x$ ) del proceso.

Cabe destacar que en las simulaciones realizadas, los mejores resultados realizan 0 nuevas puestas en marcha, minimizando los altos costos de mantenimiento.

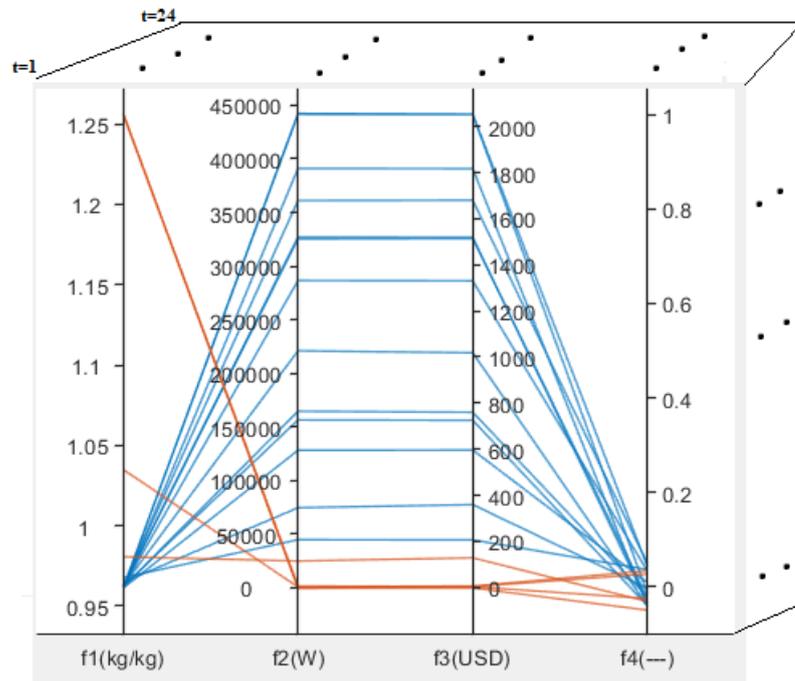


Figura 4.2. Esquema de los resultados obtenidos en la optimización multiobjetivo en coordenadas paralelas.

## Capítulo 5

### CONCLUSIONES

Inicialmente, este trabajo definió los conceptos que hacen a la optimización multiobjetivo, presentando a los Algoritmos Evolutivos utilizados en la optimización multiobjetivo. Además, se proporcionaron detalles sobre los tipos de puzolanas existentes en el Paraguay y los tipos de secadores utilizados en la industria química.

Al optimizar el secador de puzolana en un único contexto estacionario se vió que se podría reducir el costo operativo del proceso de secado en 52 %, la humedad a la salida del secador rotatorio podría disminuir en 28 %, lo que facilitaría la operación de molienda posterior al secado, además se podría disminuir la emisión de calor en 38 %, todo esto manteniendo los parámetros operativos dentro de un rango aceptable.

El ahorro en dinero para la INC, aplicando este algoritmo en el secador de puzolana, ronda alrededor de los  $5,5 \cdot 10^6$  US\$ Millones de Dólares anuales (cotizado en fecha 21/01/2020).

En la optimización semi-dinámica del secador rotatorio de puzolana se logró obtener los parámetros operativos por hora, que permitirían al secador operar en un modo más eficiente. Además, una vez puesto en marcha el secador rotatorio, se comprobó que no es recomendable detenerlo pues aumenta excesivamente los costos de mantenimiento.

Para trabajos futuros se recomienda analizar el modelo dinámico real, en donde en cualquier momento del día puede ocurrir una perturbación considerable en la demanda o en la temperatura ambiente. También se podrían optimizar otras operaciones del proceso de elaboración del cemento como son la molienda y el sistema de recolección de polvos, por dar ejemplos de utilidad concreta.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alvarez Laguna, R. J. (2014). Diseño de un secador de puzolana para molienda de cemento.
- Barán, B., Vallejos, J., Ramos, R., & Fernández, U. (2001). Multi-objective reactive power compensation. In *2001 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. Developing New Perspectives (Cat. No. 01CH37294)*, volume 1, (pp. 97–101). IEEE.
- Barán, B., Von Lücken, C., & Sotelo, A. (2005). Multi-objective pump scheduling optimisation using evolutionary strategies. *Advances in Engineering Software*, 36(1), 39–47.
- Bhaskar, V., Gupta, S. K., & Ray, A. K. (2000). Applications of multiobjective optimization in chemical engineering. *Reviews in chemical engineering*, 16(1), 1–54.
- Deb, K. (2014). Multi-objective optimization. In *Search methodologies* (pp. 403–449). Springer.
- Douglas, P., Kwade, A., Lee, P., & Mallick, S. (1993). Simulation of a rotary dryer for sugar crystalline. *Drying Technology*, 11(1), 129–155.
- Duda, W. H. (1977). *Manual tecnológico del cemento*. Reverte.
- Giangreco, J. F. & Cegla, B. B. (1993). Equipo de algoritmos evolutivos multiobjetivo paralelos. *Team Algorithm of pMOEAs*, *Proyecto de Tesis Doctoral, Informática, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Católica Nuestra Señora de la Asunción*, 16–21.
- Kiranoudis, C., Maroulis, Z., & Marinos-Kouris, D. (1996). Design and operation of convective industrial dryers. *AIChE journal*, 42(11), 3030–3040.
- Kutz, J. N. (2013). *Data-driven modeling & scientific computation: methods for complex systems & big data*. Oxford University Press.
- Lobato, F. S., Arruda, E. B., Cavalini, A. A., Steffen, V., et al. (2012). Engineering system design using firefly algorithm and multi-objective optimization. In *ASME 2011 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, (pp. 577–585). American Society of Mechanical Engineers Digital Collection.

- Miranda, A. (2016). Estudio y mejora del proceso de secado de puzolana en planta viacha-soboce s.a.
- MOPC-BGR (1993). Análisis del material puzolánico en el paraguay oriental. *Cooperación Geológica paraguay-alemana*, 88.2202.5.
- Mujumdar, A. S. (1995). *Handbook of industrial drying, revised and expanded*, volume 1. CRC Press.
- Ramírez, M. d. C. B. (2003). Optimización multiobjetivo de procesos usando algoritmos genéticos-edición única.
- Rangaiah, e. a. (2013). *Multi-objective optimization in chemical engineering: developments and applications*. John Wiley & Sons.
- Rivero, M. G. D., Rabuñal, J., Dorado, J., & Pazos, A. (2010). Introducción a los algoritmos genéticos y la programación genética. *Universidad de Coruña*, 16–28.
- Santamaría, F. S. (1983). Las puzolanas y el ahorro energético en los materiales de construcción. *Materiales de construcción*, 33(190-191), 69–84.
- Santiviago Petzold, C. (2018). Remoción de nutrientes como estruvita en reactor de lecho fluidizado: aspectos termodinámicos, cinéticos y de crecimiento.
- Scenna, N. J., Aguirre, P. A., Benz, S. J., Chiotti, O. J., Espinosa, H. J., Ferrero, M. B., Montagna, J. M., Mussati, M. C., Pérez, G. A., Rodríguez, J., et al. (2015). Modelado, simulación y optimización de procesos químicos.
- Shene, C., Cuhillos, F., Perez, R., & Alvarez, P. (1996). Modelling and simulation of a direct contact rotary dryer. *Drying technology*, 14(10), 2419–2433.
- Sotelo, A., MASULADO, J., Doldán, P., & Barán, B. (2001). Algoritmos evolutivos multiobjetivos combinados para la optimación de la programación de bombeo em sistemas de suministro de agua. In *Jornadas de Informática y Telecomunicaciones-Conferencia de Informática y Tecnología Aplicada (JITCITA 2001)*. Asunción-Paraguay.
- Toolbox, G. O. (2018). User's guide (r2011b). *The MathWorks Inc*.
- Vandervoort, A. (2011). *New Multi-Objective Optimization Techniques and Their Application to Complex Chemical Engineering Problems*. Citeseer.
- von Lüken, C., Barán, B., & Sotelo, A. (2004). Pump scheduling optimization using asynchronous parallel evolutionary algorithms. *CLEI Electronic Journal*, 7(2).
- Zitzler, E. & Thiele, L. (1999). Multiobjective evolutionary algorithms: a comparative case study and the strength pareto approach. *IEEE transactions on Evolutionary Computation*, 3(4), 257–271.
-