

DISS. ETH NO. 20555

**REALIZING A SUSTAINABLE ENERGY SYSTEM IN SWITZERLAND IN A  
GLOBAL CONTEXT**

A dissertation submitted to  
ETH ZURICH

for the degree of  
Doctor of Sciences

presented by

**ADRIANA MARCUCCI BUSTOS**

M.Sc. in Electrical Engineering, Los Andes University, Colombia  
born 1st of March 1982  
citizen of Colombia

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. A. Wokaun, examiner  
Prof. Dr. L. Bretschger, co-examiner  
Prof. Dr. K. Hungerbühler, co-examiner  
Dr. H. Turton, co-examiner

2012

# Abstract

A sustainable energy system requires the supply of today's energy demand while conserving the natural system for future generations. There is a dual relationship between sustainable development and energy: economic development implies higher energy consumption, but at the same time today's major source of greenhouse gas emissions is energy production and use. Therefore, a sustainable path where energy is supplied without compromising the global climate is needed to realize a sustainable energy system. This path has important challenges that include sufficiency, reliability, security and clean production. In Switzerland, the realization of such an energy system can be considerably influenced by global trends, comprising economic growth, resources availability, global and regional climate change mitigation policies and technology development. Thus, the aim of this dissertation is to improve understanding of how Swiss energy strategies can be affected by different global uncertainties and to determine robust technologies and policies to achieve a sustainable Swiss energy system.

Deciding the long-term strategies to realize this sustainable energy system constitutes an important challenge for policy makers, hence, analytical tools for energy analysis are important to provide insights for policy decisions. Thus, in this thesis, the future Swiss energy system was analyzed using the MERGE-ETL model. MERGE-ETL is a global integrated assessment model with a representation of the Swiss region. With this model an extensive scenario analysis of the different global uncertainties has been developed.

Four groups of scenarios were studied in this dissertation. First, global and regional policies for climate change mitigation are considerably uncertainty, since regional commitments and the actual reduction of greenhouse gas emissions can not be predicted. These different climate policies have implications on global technology development and global resource availability that affect the Swiss energy system. Thus, scenarios concerning different global and regional climate change mitigation targets were analyzed. Second, there are important uncertainties on technology development regarding future investment costs and the availability of particular technologies, such as carbon capture and storage, nuclear or hydrogen production. Hence, scenarios on technology costs; technology spillovers; and technology deployment were analyzed. Third, economic development, population growth and efficiency achievements are factors that influence future global energy consumption, and, as a consequence, global resource depletion and technology development. Accordingly, three scenarios on economic development and its consequences to the future Swiss energy system have been analyzed. Finally, resources play a key role in energy supply. However, estimation of resource availability has important uncertainties coming from the estimation of the abundance, the development of the technologies needed to extract the resources or the integration of renewable resources in the electricity

generation. Thus, the last group of scenarios analyzes different estimations for fossil, nuclear and renewable-based resources.

The results of this analysis provide important insights for the realization of the sustainable Swiss energy system including robust energy and technology pathways and climate policies.

It was found that energy efficiency improvements are required to achieve stringent climate mitigation targets. Thus, a long-term 2000 W per capita society by 2080 with intermediate steps of 3500 W per capita by 2050 is found to be a robust pathway for the Swiss energy system. The realization of such an energy system requires efficiency improvements in buildings and end-use technologies, especially vehicles and large equipment such as industrial machines. In the same way, the transformation of the energy use, concerning the electrification of “non-electric” energy demands is found to be the second robust development for a sustainable Swiss energy system. This requires the use of electric vehicles or heat pumps for space heating.

Besides efficiency improvements and electrification, the robust Swiss technology pathway leads by the end of the century to renewable-based electricity system and biomass-based non-electric energy (for production of hydrogen or synthetic oil depending on the development of the technologies). Managing the intermittency of renewable supply technologies, especially in electricity generation, is an important challenge, which needs to be considered by Swiss policy-makers and utilities. Possible options for addressing this issue include the use of pumped-storage hydropower plants for back-up capacity or improved integration with the European grid. In the electricity sector, the transition to this renewable-based energy system would require the use of nuclear power, natural gas or biomass based technologies to meet the intermediate climate targets. In the non-electric energy sector, today's oil supply is replaced by gas in the middle of the century and biomass by 2070. The achievement of this shift from oil requires the definition of incentives to reduce or replace the use of gasoline, diesel and heating oil.

Carbon capture and storage showed to be an interesting alternative to the electricity production since it would help to reduce energy-related emissions. However, the availability of this technology is highly uncertain due to technology development and public acceptance.

Importantly, the analysis of the new Swiss nuclear policy of phasing out the current reactors at the end of their lifetimes showed important trade-offs with self-sufficiency, energy related CO<sub>2</sub>-emissions reductions and energy security.

Finally, an important challenge for the Swiss energy system concerns energy security. In the transition periods, dependency on imported oil and natural gas could have important risks. Interruptible contracts and increased coordination with neighboring countries could increase Swiss energy security.

**Keywords:** sustainable energy system; climate change; mitigation; Swiss energy sector; energy efficiency; electrification; renewables; energy security

# Riassunto

Un sistema energetico sostenibile deve poter mantenere l'attuale domanda energetica conservando allo stesso tempo l'ecosistema per le generazioni future. C'è una duplice relazione tra sviluppo sostenibile ed energia: da una parte lo sviluppo economico implica un più alto consumo energetico, dall'altra la principale fonte di emissione di gas serra consiste, oggi, nella produzione e nell'uso dell'energia stessa. Per questo motivo, per realizzare un sistema energetico sostenibile, è necessario identificare un percorso in cui l'energia sia prodotta senza compromettere il clima del pianeta. Lungo questo percorso vanno affrontate importanti sfide che comprendono la quantità, l'affidabilità, la sicurezza e l'ecosostenibilità. In Svizzera la realizzazione di un tale sistema energetico può essere considerabilmente influenzata da variabili globali che comprendono lo sviluppo economico, la disponibilità di risorse, le strategie (globali e locali) di contenimento dei cambiamenti climatici e infine lo sviluppo tecnologico. Perciò gli scopi di questa tesi sono: migliorare la comprensione di come le strategie energetiche svizzere possano essere influenzate dalle incertezze su scala globale e determinare tecnologie e politiche affidabili per realizzare un sistema svizzero dell'energia.

Decidere le strategie a lungo termine per la realizzazione di tale sistema energetico sostenibile costituisce una sfida importante per il mondo politico e, per questo motivo, gli strumenti analitici per l'analisi energetica offrono un contributo importante alle decisioni politiche. In questa tesi è stata sviluppata un'analisi del futuro sistema energetico svizzero usando il modello MERGE-ETL. Il modello MERGE-ETL è un modello di valutazione integrato globale, con una rappresentazione della Svizzera come regione. Con questo modello è stata compiuta una estensiva analisi di multipli scenari di incertezze globale.

Quattro gruppi di scenari sono studiati in questo lavoro. Per prima cosa, le politiche regionali e globali per il contenimento dei cambiamenti climatici sono una variabile incerta, dato che gli impegni e le riduzioni effettive delle emissioni di gas serra non possono essere previste. Queste differenti politiche climatiche hanno implicazioni sullo sviluppo tecnologico globale e sulla generale disponibilità di risorse prime, elementi questi che influenzano il sistema energetico svizzero. Per questo sono stati analizzati diversi scenari corrispondenti alle diverse politiche di contenimento dei cambiamenti climatici. In secondo luogo ci sono considerevoli incertezze riguardo allo sviluppo delle tecnologie, in particolare rispetto al costo degli investimenti futuri e alla disponibilità futura di tecnologie specifiche come la cattura e l'intrappolamento dell'anidride carbonica, il nucleare e la produzione di idrogeno. Per cui sono stati analizzati scenari che tengono conto dei costi variabili, delle possibili ricadute tecnologiche e dei diversi livelli di applicazione delle tecnologie in questione. Come terzo punto, lo sviluppo economico, la crescita della popolazione e i fattori di efficienza energetica sono fattori che influenzano il consumo futuro di energie e di conseguenza il consumo globale di risorse e lo sviluppo tecnologico.

co. Per questo sono stati analizzati tre scenari di sviluppo economico, con diverse conseguenze sulle futuro sistema svizzero dell'energia. Infine, sebbene le risorse naturali giochino un ruolo fondamentale nell'approvvigionamento energetico, la stima della disponibilità delle riserve contiene notevoli incertezze nella valutazione della quantità delle materie stesse, dello sviluppo di tecnologie di estrazione e del grado possibile di integrazione delle fonti rinnovabile nella rete di generazione di energia elettrica. Per questo un ultimo gruppo di scenari tratta le differenti stime disponibili per le risorse, siano esse fossili, nucleari o rinnovabili.

I risultati dell'analisi forniscono indizi importanti per la realizzazione di un sistema energetico svizzero che includa allo stesso tempo un percorso energetico e tecnologico sicuro e una forte politica climatica.

Durante il corso di questo lavoro si è stabilito che miglioramenti dell'efficienza energetica sono indispensabili per realizzare una tale politica climatica. In particolare un percorso sicuro per una politica energetica svizzera è stato identificato nel raggiungimento di un obiettivo a lungo termine, ovvero una società da 2000W pro capita nel 2080, attraverso un passo intermedio, corrispondente a 3500W pro capita nel 2050. Il successo di un tale sistema energetico richiede miglioramenti di efficienza negli edifici e nelle tecnologie d'utenza finale, in particolar modo i veicoli e i grandi dispositivi come le macchine industriali. Similmente, si è identificato come secondo pilastro di questa politica energetica sostenibile la trasformazione delle modalità di consumo, ovvero l'elettificazione delle richieste energetiche oggi non elettriche. Questo richiede la transizione a veicoli elettrici e l'uso di pompe di calore per il riscaldamento ambientale.

Oltre ai miglioramenti in termini di efficienza e alla elettificazione, questo percorso di sviluppo tecnologico porta, entro la fine del secolo, verso un sistema di generazione di elettricità basato su fonti rinnovabili, con la domanda energetica non elettrica soddisfatta grazie alla biomassa (attraverso la produzione di idrogeno o di petrolio sintetico a seconda dello sviluppo delle rispettive tecnologie). Una sfida importante è rappresentata dalla gestione delle fluttuazioni di produzione tipiche delle energie rinnovabili, specialmente per quanto riguarda la generazione di elettricità. Questo aspetto deve essere considerato attentamente: possibili soluzioni al problema includono l'uso di stazioni di pompaggio idroelettriche come capacità di riserva e una migliore integrazione con la rete elettrica europea. Nel settore elettrico, la transizione verso un futuro basato sulle energie rinnovabili richiederebbe l'uso di energia nucleare, gas naturale e biomassa per soddisfare gli obiettivi intermedi di politica climatica. Nel settore non elettrico, l'attuale uso di petrolio sarà sostituito dal gas naturale verso la metà del secolo e dalla biomassa entro il 2070. Il raggiungimento di questa transizione richiede la definizione di incentivi per ridurre o sostituire l'uso di benzina, carburante diesel e olio combustibile.

La cattura e il sequestro di anidride carbonica si è dimostrato una alternativa interessante per la produzione elettrica, poiché aiuterebbe a ridurre le emissioni dovute al consumo di energia. In ogni caso, la disponibilità di questa tecnologia è altamente incerta per motivi legati allo sviluppo delle tecnologie stesse e al consenso della pubblica opinione.

L'analisi della politica nucleare svizzera, che consiste nel non sostituire i reattori attuali alla fine della loro vita, ha mostrato importanti compromessi con le esigenze di autosufficienza e sicurezza energetica e con la riduzione delle emissioni di gas serra.

Infine, una sfida importante per il sistema energetico svizzero è costituito dalla sicurezza energetica: nei periodi di transizione la dipendenza da petrolio o gas naturale importato potrebbe comportare

rischi notevoli. Contratti interrompibili e una accresciuta coordinazione con gli stati vicini potrebbero aumentare la sicurezza dell'approvvigionamento energetico svizzero.

**Keywords:** sistema energetico sostenibile, cambiamenti climatici, settore energetico svizzero, efficienza energetica, elettrificazione, energie rinnovabili, sicurezza energetica